



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## OPTIMALIZACE TLOUŠŤKY PLECHŮ MONTOVANÉ OCELOVÉ NÁDRŽE

SHEET THICKNESS OPTIMIZATION OF THE BOLTED STEEL TANK

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Konečný

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skalka, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Bc. Jiří Konečný</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Skalka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Optimalizace tloušťky plechů montované ocelové nádrže**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Montované ocelové nádrže se staví již několik desítek let a uplatňují se převážně v chemickém a petrochemickém průmyslu, čistírnách odpadních vod, potravinářském průmyslu a zemědělství. Problematika práce je z oblasti ocelových montovaných nádrží, které mají specifické nároky na výrobu s ohledem na jejich geometrii. Úkolem této diplomové práce je optimalizace tloušťky obvodových plášťových plechů nadzemní ocelové nádrže při použití materiálu s vyššími hodnotami mechanických veličin v porovnání se současným stavem (používané plechy S 350 GD). Tato diplomová práce bude realizována ve spolupráci s firmou Kohimex.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Provedení rešeršní studie související s řešenou problematikou
2. Vytvoření výpočtového modelu montované ocelové nádrže
3. Provedení optimalizace tloušťky obvodových plechů ocelové nádrže
4. Analýza dosažených výsledků a učinění závěrů

### **Seznam literatury:**

- Janíček, P., Ondráček, E., Vrbka, J. (1992): Mechanika těles - Pružnost a pevnost I, Brno
- Janíček, P., Vrbka, J., Ondráček, E., Burša, J. (2006): Mechanika těles. Pružnost a pevnost II, CERM
- Janíček, P., Petruška, J. (1991): Úlohy z pružnosti a pevnosti II, VUT Brno
- Konečný, J. (2014): Montované ocelové nádrže, FSI VUT Brno
- Kohimex, <http://www.kohimex.cz>, přístup 25. listopad 2015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou šroubovaných ocelových nádrží, respektive modifikací jedné z nádrží. Tato modifikace je realizována ve spolupráci s firmou Kohimex spol. s r.o., která se těmito nádržemi zabývá již řadu let. Práce navazuje na bakalářskou práci pod názvem „Montované ocelové nádrže“, která se zabývala již zmíněnou problematikou.

V úvodu diplomové práce je vysvětlena problematika nádrží. Následně je uveden popis nádrže a detaily modifikace. Dále jsou v práci prezentovány deformačně-napěťové stavy nádrže, nejdříve pro současný stav a dále pro navrhovanou variantu. Na základě realizovaných analýz je provedeno ekonomické zhodnocení návrhové varianty nádoby vzhledem ke stávající nádobě.

Výsledky této práce umožňují lépe pochopit problematiku návrhu šroubovaných nádrží, případně dávají podnět na inovaci současného způsobu navrhování.

## **Klíčová slova**

Montované ocelové nádrže, metoda konečných prvků, MKP, ANSYS, Shell 281, ČSN EN, ekonomická úspora, FSI

---

## **ABSTRACT**

This thesis deals with bolted steel tanks, especially modification one of them. This modification is realized in cooperation with Kohimex spol. s r.o., which is assembling these tanks for many years. The thesis continues on the bachelor one called "ASSEMBLED STEEL TANKS", which has already dealt with this issue.

At the beginning of the thesis the issue of tanks is explained. Furthermore, there is made description of the tank modification details. At the next stage, the work presents stress-strain states of the tank, first for the current tank and then for the modified option. On the basis of completed analysis is made economic evaluation of design modified tank option due to the current tank.

The results of this study allow better issue understanding of bolted tanks designing or they give impuls to improve the current way of designing.

### **Key words**

Assembled steel tanks, finite elements method, FEM, SHELL 281, CSN, eurocodes, economic evaluation, FMI

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KONEČNÝ, J. Optimalizace tloušťky plechů montované ocelové nádrže. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Skalka, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace tloušťky plechů montované ocelové nádrže vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jiří Konečný

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Děkuji tímto panu doktorovi Petru Skalkovi za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval při vypracování této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat všem, se kterými jsem vedl rozhovory využité ke zpracování této práce. Jsou to absolutní špičky ve svém oboru. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat rodině a kamarádům za dlouhodobou podporu při studiu.



## OBSAH

Úvod.....	11
1 Popis problémové situace montovaných šroubovaných nádrží .....	13
1.1 Profil společnosti Kohimex .....	13
1.2 Rozdělení nádrží z technologického hlediska .....	16
2 Zadání a cíle řešení .....	17
2.1 Zadání.....	17
2.2 Cíle, kterých má být dosaženo .....	17
2.3 Systém podstatných veličin [3],[4] .....	17
2.4 Systém podstatných veličin – obecné pojednání [3] .....	18
2.5 Konkrétní aplikace systému podstatných veličin .....	19
3 Popis konstrukce nádrže .....	21
3.1 Rozdělení nádrže dle technologického hlediska .....	22
3.2 Popis hlavních konstrukčních dílů této nádrže.....	22
4 Popis výroby a montáže nádrže kkl 27-9r [2] .....	27
4.1 Výroba plášťových plechů .....	27
4.2 Výroba konstrukčních dílů a vybavení .....	28
4.3 Montáž nádrže .....	30
4.4 Dokončení a předání stavby .....	31
5 Detaily konstrukčních změn .....	33
5.1 Parametry nádrže.....	33
5.2 Materiály .....	34
5.3 Ekonomické hledisko .....	35
6 Určení deformačně napěťových stavů nádoby .....	37
6.1 Vymezení MS.....	37
6.2 Obecné normy a standardy používané k návrhu[1].....	37
6.3 Použití bezpečnosti a dovolená napětí.....	38
7 Metody řešení .....	41
7.1 Použitý software.....	41
7.2 Úroveň výpočtového modelu .....	42
8 Výpočtový model provozního zatížení nádoby .....	43
8.1 Model geometrie .....	43
8.2 Model materiálových vlastností .....	45
8.3 Model vazeb .....	46
8.4 Model zatížení.....	47

---

8.5	Tvorba sítě .....	49
9	Výpočtový model zatížení větrem .....	51
9.1	Model geometrie.....	51
9.2	Model materiálu .....	52
9.3	Model zatížení a počátečních podmínek .....	53
9.4	Tvorba sítě.....	54
9.5	Prezentace a analýza výsledků CFD analýzy .....	54
10	Prezentace a analýza výsledků řešení .....	57
10.1	Analýza současného stavu .....	57
10.2	Modifikovaná verze nádrže .....	65
11	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	75
11.1	Snížení hmotnosti objektu .....	75
11.2	Přímá ekonomická úspora.....	75
11.3	Využitelnost materiálu.....	76
11.4	Doporučení .....	76
12	Závěr .....	79
	Seznam použitých zdrojů .....	81
	Seznam použitých obrázků a tabulek.....	83
	Seznam obrázků .....	83
	Seznam tabulek .....	84
	Seznam použitých symbolů a zkratek .....	85

## ÚVOD

Problematika montovaných ocelových nádrží je stará téměř 100 let (1916). Tehdy se využívaly především pro skladování ropy a podobných těžce skladovaných medií. Nyní se tyto nádrže používají na skladování velké škály různorodých kapalných i sypkých médií. Hlavní výhodou těchto nádrží je rychlost výstavby, možná rozebíratelnost, a oproti jiným alternativám i jednoduchá montáž a údržba.

Hlavním prvkem těchto nádrží jsou plášťové ocelové plechy, které jsou k sobě spojeny šroubovým spojem. Toto mají všechny typy montovaných ocelových nádrží společné. Dále se mohou lišit způsobem kotvení, výztuhami, střechou, popřípadě dalšími nezbytnými prvky nádrží (revizní otvor, žebřík, tmel apod.). Avšak všechny tyto díly musí při návrhu podléhat určitým normám a standardům. Tyto předpisy nám zajišťují bezpečnost konstrukce i při jejím dlouhodobějším používání. Neexistuje jednotná norma pro návrh těchto nádrží, vždy jde o kombinaci více norem, což klade větší nároky na znalosti a zkušenosti konstruktéra. Dokonce i norma ČSN EN většinou nezahrnuje všechny díly těchto nádrží a navíc je rozdělená do mnoha podskupin, respektive eurokódů (ČSN EN 1990, 1991, 1993 atd.) ve kterých je zahrnuta velká škála dalších částí (např. ČSN EN 1991-1-1).

Zřejmě jako všechna technická odvětví i tyto nádrže vyžadují v závislosti na pokroku nutnost vývoje. Je nutno zmínit že již první nádrže byly navrženy velmi dobře, jelikož se využívá téměř stále stejný princip jako před lety. Výrobci se v navrženém sortimentu liší převážně doplňujícími technologiemi, materiálem, povrchovou úpravou plechů, případně jejich rozměry. Proto je nutné, aby každá firma měla snahu vyvíjet nové způsoby úspory nákladů při zachování stejné, případně vyšší kvality, bezpečnosti a životnosti konstrukce. Jedině tak si může udržet svou pozici na trhu, respektive svou konkurenceschopnost.

## **1 POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE MONTOVANÝCH ŠROUBOVANÝCH NÁDRŽÍ**

V České republice jsou pouze dva významní tuzemští výrobci, avšak je zde více společností, které se touto problematikou zabývají. Těmito dalšími společnostmi jsou buď partnerské firmy, které dodávají příslušenství, nebo pouze montážní/demontážní firmy. Tyto firmy převážně pouze rozebírají staré, již nepotřebné, nádrže po záruce a následně je, po důkladném očištění a kontrole, opět kompletují. Tyto „second-handové“ nádrže se opětovně staví převážně kvůli jejich nižší ceně oproti novým nádržím. Zde je nutno podotknout, že i když je prováděna důkladná vizuální kontrola, tyto plechy, jelikož byly již řadu let používány, nemají zaručené mechanické vlastnosti.

Vzhledem k možnosti případných havárií, je tedy bezpečnější používat plechy se zaručenými mechanickými vlastnostmi a více se zabývat spíše ekonomicko-technickou stránkou. Jednou z mnoha možností je úprava charakteristických rozměrů nádrže. Jedním ze zmíněných dvou tuzemských výrobců je společnost Kohimex spol. s r. o., která má snahu podílet se na možných vylepšeních tohoto odvětví.

Převážnou většinu své existence stavěla své nádrže v tuzemsku, avšak v posledních letech, v důsledku velké poptávky také zahraničního trhu, se většina jejích staveb realizuje po celé Evropě (v ojedinělých případech dokonce i mimo ní). Tento fakt ovšem zapříčinil nárůst ceny produktu v závislosti na vzdálenosti, respektive ceně za kilometr, kterou je firma nucena zaplatit při přepravě. Tato cena na 1 km se odvíjí od rozměru a hmotnosti nákladu. Jelikož je snaha minimalizovat náklady, klade se zde otázka, zda by nebylo rentabilní modifikovat určité rozměry (tloušťky plechů) těchto nádrží. Došlo by tak k redukci hmotnosti, takže i k menším nákladům (nejen) za dopravu. Tento fakt spolu s lepší manipulovatelností by mohl mít za následek lepší konkurenceschopnost a kvalitu (inovativnost) produktu jako celku.

### **1.1 Profil společnosti Kohimex**

Firma Kohimex spol. s r.o. se zabývá návrhem, výrobou, i distribucí šroubovaných ocelových nádrží zhruba 15 let. Jedná se poměrně o malou společnost se sídlem v Brně. Od svého vzniku vyrobila již zhruba 1000 nádrží.

Od roku 2001 vlastní společnost Kohimex spol. s r. o. certifikát FM APPROVED pro požární nádrže KKL®. V roce 2004 byla v této firmě zavedena certifikace systému managementu dle ČSN EN ISO 9001. Následovně byla tato společnost také certifikována na systém environmentálního managementu a environmentální politiky dle ČSN EN ISO 14001.

### **Ukázky nádrží firmy Kohimex**

Na následujících fotkách je možno vidět ukázky nádrží firmy Kohimex, které se realizovaly v posledních dvou letech. Jedná se o tuzemské i zahraniční stavby.



**Obrázek 1.1 Sila na kukuřici na Ukrajině [2]**



**Obrázek 1.2 Sprinklerová nádrž dle FM Global pro Amazon v Praze[2]**





Obrázek 1.3 Nádrže pro ČOV v Polsku [2]



Obrázek 1.4 Sila na senáž ve Švýcarsku[2]

## 1.2 Rozdělení nádrží z technologického hlediska

### ❖ *Podle okolního prostředí*

- venkovní,
- vnitřní

### ❖ *Podle způsobu kotvení*

- kotvení na „startovací segment“,
- do betonu pomocí kotevního úhelníku,
- kotvení do drážky,
- na nohách.

### ❖ *Podle provedení dna*

- dno z vodo-stavebního betonu,
- betonové dno s folii,
- trychtýřové betonové dno,
- ocelové šroubované dno,
- ocelové svařované dno.

### ❖ *Podle typu střechy*

- bez střechy (otevřené),
- se střechou,
  - kuželová,
  - s trapézovou střechou,
  - membránová,
  - laminátová,
  - PVC (plachty).

### ❖ *Podle zateplení*

- bez zateplení
- se zateplením

### ❖ *Podle povrchové úpravy materiálu*

- ocelové plechy s nátěrem
- smaltované
- speciální epoxidové vypalovací nástríky

### ❖ *Podle způsobu montáže:*

- od základu,
- od střechy,
- bez strojní manipulace,
- manipulace pomocí jeřábu.

### ❖ *Možnosti dopravení na střechu*

- žebřík,
- schodiště,
- výtah. [1]

## 2 ZADÁNÍ A CÍLE ŘEŠENÍ

### 2.1 Zadání

Proveďte optimalizaci tloušťek obvodových plechů nádrže při použití materiálu s vyššími mechanickými vlastnostmi, než jsou stávající. Numerický výpočet proveďte v souladu se stávajícími náležitostmi.

Optimalizace je definována jako proces výběru konkrétní varianty, která se zdá nejvhodnější z množství možných jevů. Optimalizovat se dá buď celá soustava, nebo jenom určité prvky soustavy.[10]

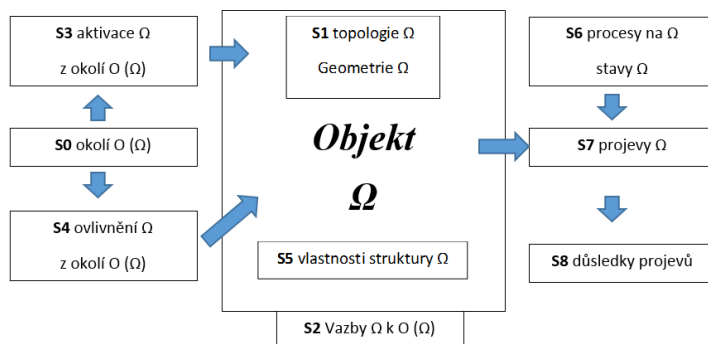
Po analýze zadání (zadáno zadavatelem problému) lze konstatovat, že se nejedná o optimalizaci tloušťky plechů nádoby, nýbrž o návrh tloušťky s ohledem na vznik MS pružnosti ve smyslu lokálních deformací plechů a MS deformační stability.

### 2.2 Cíle, kterých má být dosaženo

1. Provedení rešerše dostupné literatury související s řešenou problematikou nádrží.
2. Popis jednotlivých prvků nádrže KKL27-9R.
3. Vytvoření modelu geometrie dle upravené výkresové dokumentace.
4. Vytvoření výpočtového modelu.
5. Provedení řešení a analýzy výpočtového modelu a výsledků řešení.

### 2.3 Systém podstatných veličin [3],[4]

Dle problémové situace, a cílů řešení je možno využít struktury systému podstatných veličin, která je prezentována na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Podmnožiny systému podstatných veličin



## 2.4 Systém podstatných veličin – obecné pojednání [3]

Podmnožiny  $\{S_i\}$  vytváří tuto soustavu:

**Podmnožina S0** Obsahuje veličiny  $v_0$  popisující **prvky okolí entity**; jsou to tzv. environmentální veličiny.

**Podmnožina S1** Obsahuje veličiny  $v_1$ , které popisují **strukturu a topologii entity**, tj. rozmístění prvků v prostoru (v okolí  $O$  ( $\Omega$ ) entity) a geometrii těchto prvků – lze je proto označit jako objektové veličiny.

**Podmnožina S2** Její veličiny  $v_2$  popisují **podstatné vazby** entity s jeho okolím  $O$  ( $\Omega$ ) a na nich přebíhající **interakce**, resp. vazby mezi jednotlivými pod objekty, na něž je entita dekomponována. Popsat podstatné vazby vyžaduje vymezit i podstatné prvky entity objektu. Tyto veličiny je možné označit jako vazbové veličiny.

**Podmnožina S3** Patří do ní veličiny  $v_3$ , které vyjadřují takovou **aktivaci entity**  $\Omega$  z jejího okolí, která na entitě vyvolává procesy. Veličiny  $v_3$  je možné označit jako aktivační veličiny nebo taky podněty či příčiny.

**Podmnožina S4** Tato podmnožina obsahuje veličiny  $v_4$ , které **ovlivňují entitu** z okolí, konkrétně na ní probíhající procesy. Jsou to tzv. ovlivňující veličiny.

**Podmnožina S5** Patří sem veličiny  $v_5$  vyjadřující **oborové vlastnosti prvků struktury** entit, na kterých se řeší problém. Mohou to být vlastnosti geometrické, strukturní, fyzikální, mechanické, technologické, přičemž jednotlivá vlastnost může být vyjádřena i několika charakteristikami. Lze je nazvat jako strukturně – vlastností veličiny, resp. oborové veličiny.

**Podmnožina S6** Obsahuje veličiny  $v_6$  popisující **procesy** probíhající na struktuře entity, uvádějí entitu do různých stavů, odlišných od stavu počátečních. Jsou to procesní veličiny a stavové veličiny. Oboje se obvykle dávají do jedné podmnožiny, protože je mezi nimi úzká souvislost – stavy jsou důsledky procesů.

**Podmnožina S7** Patří sem veličiny  $v_7$  vyjadřující **projevy entity**, které odpovídají stavům, do nichž se entita dostala v důsledku proběhnutých procesů. Jsou to projevové veličiny.

**Podmnožina S8** Zahrnuje veličiny  $v_8$  popisující **důsledky projevů** entity na její okolí nebo na ni samotnou. Pro tyto veličiny lze použít název důsledkové veličiny.

## 2.5 Konkrétní aplikace systému podstatných veličin

$\Omega$ : objektem je nádrž KKL27-9R

### ***Podmnožina S0 – okolí objektu:***

- Veličina  $v_0$  obsahuje podmínky a vazby prostředí, případně materiálové charakteristiky.

### ***Podmnožina S1 – topologie a geometrie objektu:***

- Veličinou  $v_1$  je geometrie nádrže, tzn. průměr, výška nádrže a tloušťka jednotlivých plechů

### ***Podmnožina S2 – podstatné vazby objektu k okolí:***

- Veličina  $v_2$  popisuje kotvení nádrže

### ***Podmnožina S3 – aktivace objektu z okolí:***

- Veličina  $v_3$  se nazývá aktivační veličinou, v našem případě se jedná o hydrostatický tlak media a zatížení větrem.

### ***Podmnožina S4 – ovlivňování objektu z jeho okolí:***

- Veličinami  $v_4$  jsou veličiny ovlivňující entitu, jedná se například o přeplánování plechů (lokálně zvýšená tuhost), větší tuhost konstrukce v okolí žebříku apod.

### ***Podmnožina S5 – vlastnosti prvků struktury objektu:***

- Jedná se částečně o veličiny  $v_1$  doplněné o jejich mechanické vlastnosti.

### ***Podmnožina S6 – procesy na objektu a jeho stavu:***

- Veličina  $v_6$  popisuje procesy uvádějící entitu do různých stavů, v našem případě to může být boulení nádrže nebo možná ztráta stability.

### ***Podmnožina S7 – projevy (chování) objektu:***

- Mezi veličiny  $v_7$  můžeme zařadit posuv plechu při boulení nebo napětí vzniklé přeplánováním plechů.

### ***Podmnožina S8 – důsledky projevů objektu:***

- Veličiny  $v_8$  popisují důsledky stavů, jako je například porušení soudružnosti, mezní stav deformace nebo ztráta stability.

### 3 POPIS KONSTRUKCE NÁDRŽE

Tato diplomová práce se zabývá nádrží (Projekt A1009), která byla realizována v druhé polovině roku 2014. Jedná se o typizovaný zásobník na kapalinu velmi podobnou vodě. Tato nádrž má firemní označení KKL27-9R. Firma Kohimex se rozhodla modifikovat tento typ nádrže, z důvodu zvýšené poptávky tohoto typu.

Firma poptávající tuto nádrž, již vlastnila 2 nádrže menšího objemu, které se rozhodla demontovat a místo nich postavit jednu velkoobjemovou. Důvodem demontáže dvou stávajících nádrží byla jejich nedostatečná kapacita a staří. Jak již bylo zmíněno dříve, snadná demontovatelnost je jednou z hlavních výhod těchto nádrží, takže obměna těchto nádrží trvala něco kolem měsíce, včetně nucených technologických přestávek.

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.1) můžeme vidět analyzovanou nádrž.

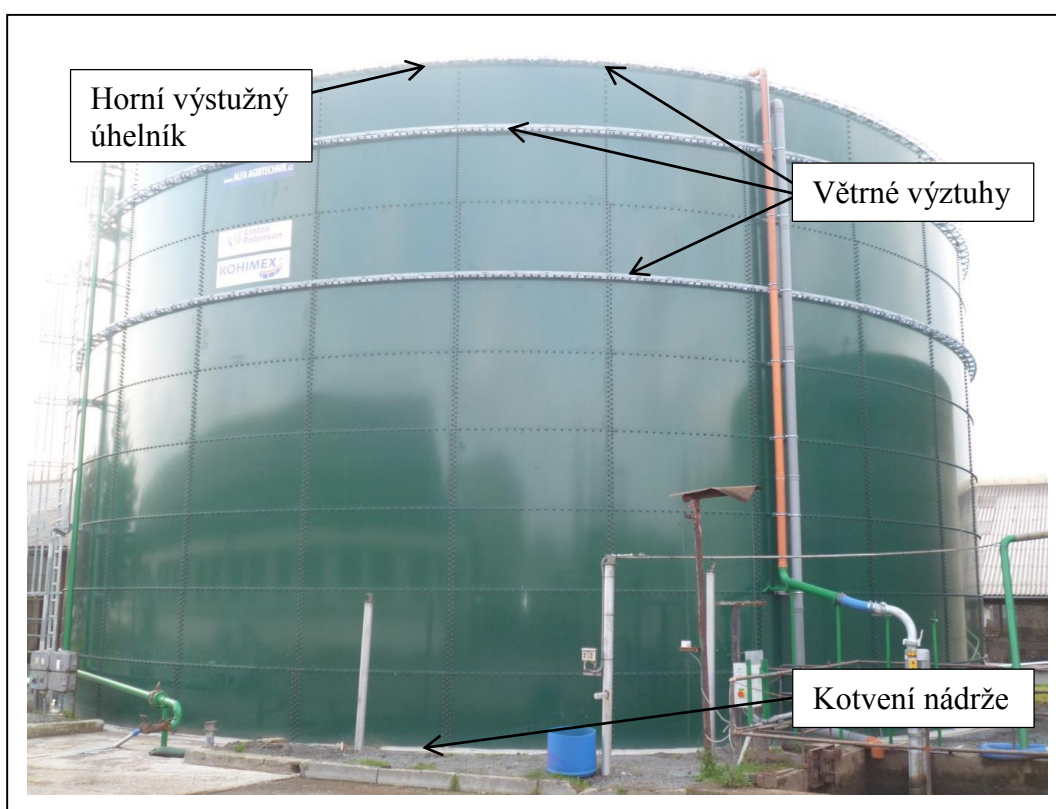


Obrázek 3.1 Foto modifikovaného typu nádrže

### 3.1 Rozdělení nádrže dle technologického hlediska

- Venkovní
- kotvená na „startovací segment“,
- se dnem z vodo-stavebního betonu,
- bez střechy (otevřená),
- bez zateplení,
- povrchová ochrana plechů-speciální epoxidové vypalovací nástřiky.

### 3.2 Popis hlavních konstrukčních dílů této nádrže



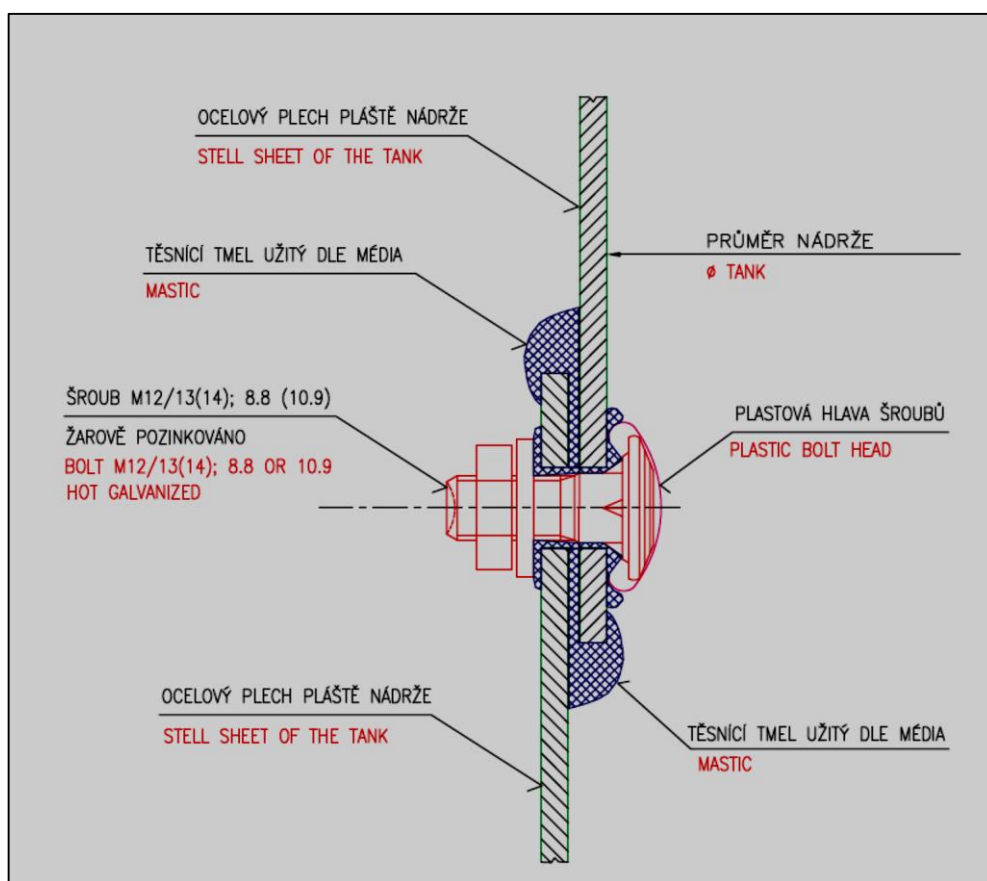
Obrázek 3.2 Hlavní konstrukční díly nádrže

### 3.2.1 Šroubový spoj a plášťové plechy

Šroubový spoj a plášťové plechy jsou nejdůležitější prvky celé nádrže, to je zohledněno i při návrhu samotné nádrže. Hlavním účelem těchto dílů je vytvořit takové spojení, aby bylo možno uvnitř nádrže uchovávat určité medium. Zároveň musí být toto spojení navrženo tak, aby odolávalo nejen vnitřnímu, ale i vnějšímu zatížení. Jako prvek zajišťující vodotěsnost spoje, je zde aplikován speciální tmel, který ovšem získá své požadované vlastnosti až po řádném zvulkanizování.

Šroubový spoj se skládá ze speciálního dřívkového šroubu s poplastovanou hlavou, matice a podložky. Šroub má konkrétní jmenovitý průměr, který se používá jednotný na celé nádrži, liší se pouze délkou a dříkem. Nejběžněji používaná třída pevnosti těchto šroubů je 8.8, výjimečně 10.9. Používá se jedno, nebo více řadý spoj (v tomto případě se jedná o jednořadé vodorovné spoje a svislé 1 až 3-řadé spoje.) Povrchová úprava šroubového spoje je žárové pozinkování.

Dalším, již zmíněným, prvkem jsou plášťové plechy. Tyto plechy se zakládají postupně do kruhu a po vytvoření kruhu se může začít montovat další řada. Tloušťky plechů jsou zvoleny dle statického výpočtu a zkušeností. Plechy jsou vyrobeny všechny ze stejného materiálu a jakosti, konkrétně se jedná o materiál s mezí kluzu 350 MPa. Povrchová úprava plechů je žárový pozink, s následným nanesením speciálního vypalovacího nástřiku.

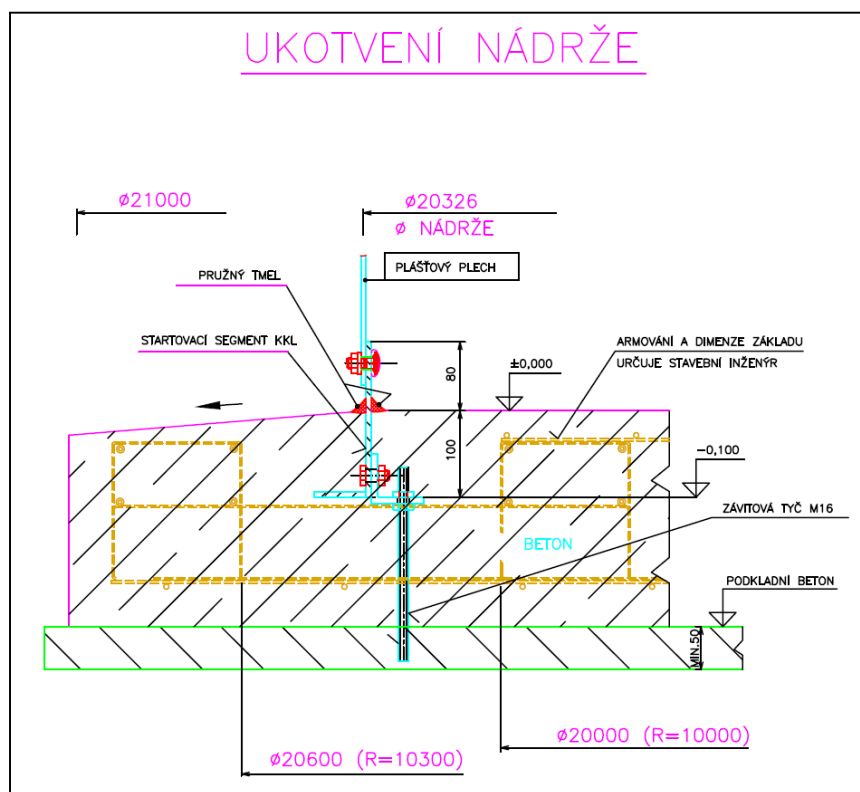


Obrázek 3.3 Detail šroubového spoje



### 3.2.2 Startovací segment

Jedná se o jednu z mnoha možností kotvení nádrže. Do vynechané drážky vytvořené armováním se vloží speciální úhelník a pomocí spojek se přikotví k betonu. Tomuto procesu se říká „osazení startovacího segmentu“. Po osazení startovacího segmentu následuje zalití betonem do určité výšky. Princip kotvení je pro lepší představu zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 3.4). Kotvicí úhelník byl dle požadavků lakovaný v barvě nádrže (není nutno opatřovat povrchovou vrstvou). Materiál tohoto segmentu je stejný jako materiál obvodových plechů a má převážně tloušťku shodnou s tloušťkou plechů, ke kterému se montuje, což je v našem případě 8 mm.



Obrázek 3.4 Detail kotvení nádrže (Startovací segment)

Na dalším obrázku (Obrázek 3.5) je znázorněn osazený startovací segment, těsně před následným zabetonováním.



**Obrázek 3.5 Osazený startovací segment připravený k zalití betonem**

### **3.2.3 Revizní otvor**

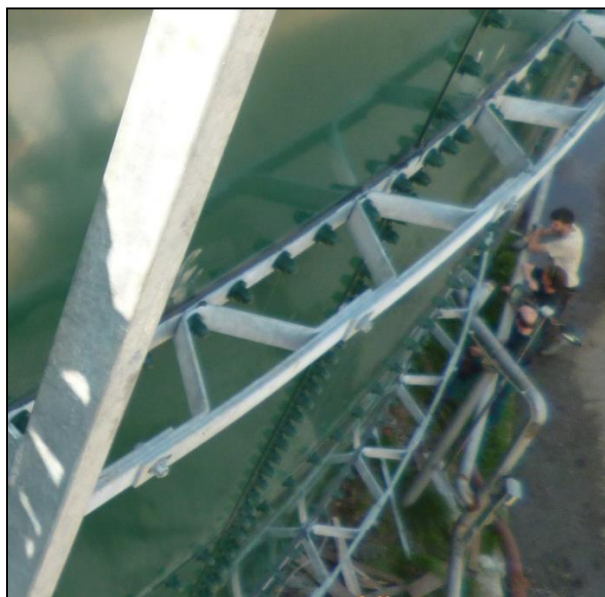
Revizní otvor (Obrázek 3.6) je jedním z hlavních doplňkových prvků všech montovaných ocelových nádrží. Jedná se o díl, který je navržen dle AWWA. Slouží převážně ke kontrolám a lepší manipulaci s technologiemi a příslušenstvím. Skládá se z rámu a víka. Rám je připevněn k plášťovým plechům nádrže. Celková hmotnost revizního otvoru včetně víka je přibližně 130 kg. Je vyroben ze stejného materiálu jako plášťové plechy, ale je opatřen jinou povrchovou úpravou, žárovým zinkováním.



**Obrázek 3.6 Revizní otvor (včetně víka)**

### 3.2.4 Větrné výztuhy

Jedná se o vodorovnou výztuhu pláště. Dochází zde lokálně k nárůstu tuhosti a hmotnosti, která napomáhá k udržení kruhovitosti nádrže a to, jak při montáži, tak při působení vnějších zatížení nádrže, jako je např. vítr. Skládá se z určitého počtu speciálních spojek připevněných k plášti. Povrch všech částí těchto výztuh je zároveň pozinkován. Jedna řada větrných výztuh váží přibližně 560kg.



Obrázek 3.7 Zkompletovaná a namontovaná větrná výztuha

### 3.2.5 Horní výztužný úhelník

Jedná se o vnitřní zakružený úhelník, který je vyroben z profilu L60x60x6. Povrchová úprava je zde taktéž pozinkování. Tento úhelník je vyroben z materiálu s mezí kluzu menší zhruba o 100MPa, než je materiál plášťových plechů. Montáž se provádí přímo na plášť. Hmotnost toho úhelníku činí zhruba 400kg.

I když je tato nádrž bez střechy, tento úhelník je zde kvůli zvýšení tuhosti v horní části nádrže, kde jsou dle statického výpočtu umístěny obvodové plechy s nejmenší tloušťkou.

Z předešlého je zřejmé, že opravdu největší vliv na hmotnost nádrže mají plášťové plechy, viz Tabulka 3.1.

**Tabulka 3.1** Přibližné hmotnosti dílů nádrže a mez kluzu použitých materiálu

-	Hmotnost [Kg]	Mez kluzu součásti [Mpa]
Plášťové plechy	28000	355
Výztuhy nádrže	2000	235
Žebřík s plošinou	200	235
Revizní otvor	130	355
Spojovací materiál a zbylé prvky	700	-



## 4 POPIS VÝROBY A MONTÁŽE NÁDRŽE KKL 27-9R [2]

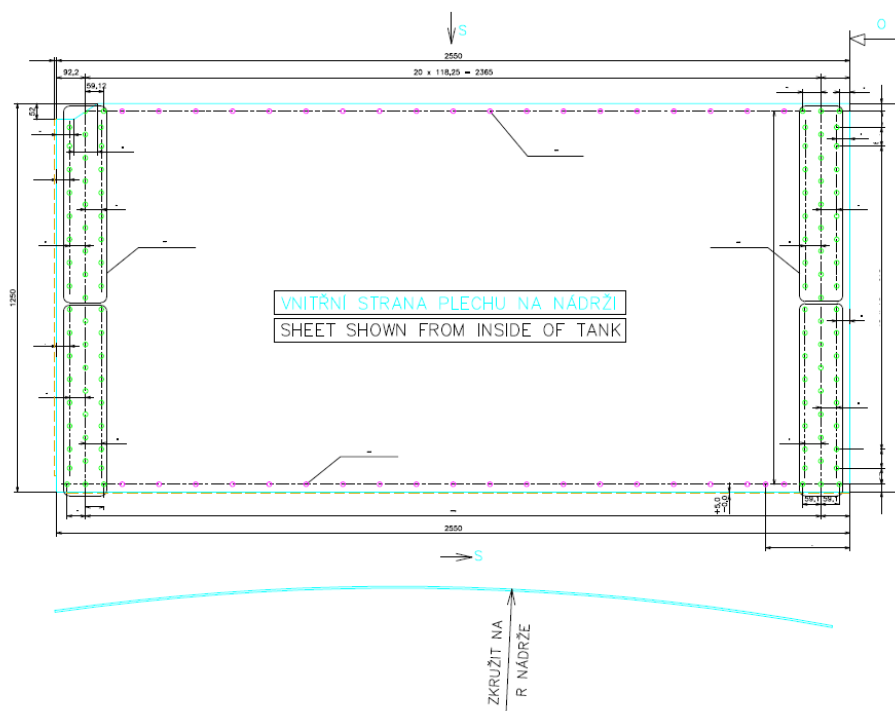
Výroba jednotlivých dílů těchto nádrží se provádí formou subdodávky na základě objednávky. Vstupní materiál je uskladněn a seřazen ve skladu firmy Kohimex. Kontrolují se zde parametry vykázané ve výrobní dokumentaci společně s objednávkou a množstvím potřebným pro výrobu.

Výrobní postup probíhá v těchto krocích:

- výroba plášťových plechů
- výroba konstrukčních dílů a vybavení
- montáž nádrže
- dokončení a předání stavby

### 4.1 Výroba plášťových plechů

- Před samotnou výrobou se provede **kontrola** a změření tloušťky zinkové vrstvy. Hodnoty se zaznamenají do evidenčního listu plechů, kde se zároveň uvede i číslo plechu odpovídající výrobnímu výkresu. Číslo plechu je tvořeno číslem řady-X a pořadím plechu dle výkresu-XX-→RX-XX.
- Provede se **děrování** plášťového plechu. Děrování probíhá na konkrétním stroji dle programu vytvořeného na základě dodané výkresové dokumentace.
- Po vyděrování prvního, každého pátého a posledního plechu se provede **přeměření roztečí** sousedních krajních děr a vnějších děr plechu



Obrázek 4.1 Ukázka výrobního výkresu

- **Skružování** plechů na poloměr 10,1m (průměr 20,33 m).
- Každý plech se překontroluje, zda zakružení odpovídá danému poloměru, podle předem zhotovené šablony, pokud není dosažena přesná hodnota, skružuje se znovu.
- Zkontrolují se rozměry a děrování
- **Lakování**- provádí se na specializované kontinuální lince firmy Color Steel s.r.o., kde proběhne odmaštění, fosfátování, nanesení vrstvy nástřiku a vypálení v peci při 180°C. Poté proběhne ochlazení plechu.
- **Kontrola tloušťky nástřiku** na 180  $\mu\text{m}$ . Měří se na 5-ti náhodně vybraných místech každé strany a do evidenčního listu plechů se zaznamená průměrná hodnota. Pokud hodnota je pod stanovenou tloušťku, provede se nástřík ještě jednou.
- **Balení**- na plechy se lepí ochranná fólie, tak aby nedocházelo k poškrábání vrstvy nástřiku. Plechy se pak následně ukládají na sebe. Maximální hmotnost palety je 2t. Plechy se ukládají na speciální palety k tomu určené. Takto nabalený materiál je připravený k expedici.

## 4.2 Výroba konstrukčních dílů a vybavení

Před samotnou výrobou se kontroluje kvalita a množství dodaného materiálu s vykázaným množstvím a kvalitou ve výkresové dokumentaci.

### 4.2.1 Horní výstužné úhelníky

- Úhelníky se **nadělí** na potřebnou délku a vyděrují se na děrovacím stroji dle výkresové dokumentace.
- Provede se **zakružení úhelníku** na požadovaný poloměr.
- Zkontrolují se rozměry a děrování.
- **Zinkování** se provádí ponořením dílu do žárového zinku, tím vznikne finální povrchová úprava.

#### 4.2.2 Kotevní segmenty

- Jednotlivé díly segmentu se vyřezou na potřebný tvar a vyděrují dle výkresové dokumentace.
- Svislé části se zakruží na daný poloměr.
- Proběhne svaření dílů a znovu se zkontroluje zakružení kotevních dílů.
- Zkontrolují se rozměry a děrování
- Na část, která „vyčnívá“ nad beton se provede ochranný nástřík, stejný jako na plášťové plechy.
- Provede se kontrola tloušťky nástříku

#### 4.2.3 Větrné výztuhy

- Materiál se nadělí a vyděruje podle výkresové dokumentace.
- Provede za skružení úhelníků a ohýbání VV na ohraňovacím lisu.
- Zkontrolují se rozměry a děrování.
- Provede ze žárové zinkování dílů jako finální povrchová úprava.

#### 4.2.4 Žebříky, plošiny a vybavení

- Provede se dělení a děrování materiálu.
- Dále je nutno svařit jednotlivé díly k sobě.
- Následuje kontrola základních rozměrů po sestavení a srovnání údajů s výrobními výkresy.
- Provede se žárové zinkování dílů jako finální povrchová úprava.
- Po provedení všech potřebných operací následuje spáskování a nabalení.

#### 4.2.5 Balení a kompletace dílů nádrže

- Kontrola množství a kompletnosti veškerého vyráběného materiálu podle výkazu v projektové dokumentaci.
- Nabalení spojovacího materiálu, tmelícího materiálu, vybavení a dalšího příslušenství.
- Popis jednotlivých palet.

### 4.3 Montáž nádrže

Montáž nádrží se skládá ze dvou dílčích částí:

- **montáže startovacího segmentu,**
- **montáž pláště**

Montáž startovacího segmentu se provádí několik dnů před plánovaným zahájením montáže pláště z důvodu dodržení potřebné technologické pauzy (vytvrzení betonu).

#### 4.3.1 Montáž startovacího segmentu

- Nejdříve je nutno **určit osy a střed nádrže**. Tento krok je potřeba provést velmi přesně, odvíjí se od něho totiž celé ustavení nádrže. Určení středu a os se provádí dle výkresové dokumentace nejen společnosti Kohimex, ale také poptanou firmou.
- V dalším kroku je nutno provést usazení segmentu do předem připravené drážky. Po usazení se obvod jednotlivých dílů segmentu sešroubuje.
- Dále se provede přeměření a přibližné ustavení již sešroubovaných dílů.
- Následovně je nutno provést osazení segmentu do určité výšky. Tento krok se skládá ze dvou částí tj. z vyvrtání děr na závitové tyče a zakotvení závitových tyčí.
- Po zabetonování závitových tyčí je nutno tyto spojit s již smontovaným obvodem segmentu.
- Dále následuje opětovné přeměření všech potřebných rozměrů.
- Pokud ukotvený segment splňuje všechny požadavky, následuje zabetonování.

#### 4.3.2 Montáž pláště

Nejdříve je nutno zkontrolovat zda je startovací segment správně zabetonován, beton je vytvrzený. Pokud jsou tyto požadavky splněny, následuje očištění segmentu a je zahájena samotná montáž pláště:

- Nejdříve je nutno provést ustavení a zakotvení zdvihacího zařízení.
- Dále probíhá montáž prvního (horního) lubu plechů včetně spojek na výztuhy
- V následujícím kroku probíhá napojení plechů na zdvihací zařízení. Po dokončení montáže každého lubu je nutno nádrž „přepapučovat“ (demontáž a montáž spojek spojující zdvihací zařízení s plechy), případně namontovat potřebné technologie a příslušenství.

- Pokud je první lub spojen se zdvihacím zařízením je možno namontovat horní výstužný úhelník a první větrnou výztuhu.
- Dále následuje montáž druhého lubu plechů. Na tyto plechy se při montáži připevňují i speciální spojky. Po dokončení montáže dvou lubu jsou na spojky připevněny větrné výztuhy
- Stejný postup se uplatňuje i pro montáž třetího a čtvrtého lubu, včetně montáže poslední větrné výztuhy.
- Následuje montáž pátého až osmého lubu.
- U poslední (deváté řady) je nutno plech spojit nejen s ostatními plechy, ale také se startovacím segmentem. Tato operace se provede u všech plechů kromě jednoho. (Poslední plech se vynechává z důvodu snadnější manipulace, respektive přenesení zdvihacího zařízení z nádrže).
- Poté se provede demontáž zdvihacího zařízení a vynesení jednotlivých dílů ven z nádrže. Po vynesení zdvihacího zařízení se namontuje i poslední plech (Tzv. zavření nádrže).
- Pokud je nádrž „zavřená“ probíhá napojení technologií (příruby, žebříky apod.)

#### 4.4 Dokončení a předání stavby

- Po napojení všech technologií je na řadě odmaštění a nanesení přípravku SIKA.
- Po nanesení SIKA je možno provést montáž revizního otvoru a provést poslední montážní úpravy technologií a příslušenství.
- Pokud stavba odpovídá všem požadavkům, následuje kontrola stavby zodpovědnou osobou včetně fotodokumentace a předávacího protokolu.

## 5 DETAILY KONSTRUKČNÍCH ZMĚN

Tato diplomová práce se zabývá změnou tloušťek obvodových plechů v závislosti na použitém materiálu. Konkrétní základní parametry jsou vypsány v následující tabulce.

### 5.1 Parametry nádrže

**Tabulka 5.1** Základní parametry nádrže

Typ Nádrže	Průměr nádrže [mm]	Počet lubů <sup>1</sup> [-]	Výška nádrže [mm]	Horní úhelník	Větrná výztuh a I	Větrná výztuha II	Větrná výztuha III
<b>KKL27-9R</b>	Ø 20330	9	10895	L60x60x6	Nad R1	Mezi R1-R2	Mezi R3-R4

Jedná se o nádrž s 243 plechy, přičemž hmotnost všech plechů je přibližně 28 tun. Hmotnost celé konstrukce činí zhruba 31 tun (Tabulka 3.1). Z předešlého vyplývá, že plášťové plechy tvoří převážnou většinu hmotnosti celé nádrže, respektive ostatní součásti této nádrže tvoří přibližně pouze 10% hmotnosti celku. Použité tloušťky plechů jsou vypsány v následující tabulce.

**Tabulka 5.2:** Použité tloušťky obvodových plechů a jejich výška

Číslo lubu <sup>2</sup>	Tloušťka plechu t [mm]	Výška h [mm]
<b>1</b>	3	10825
<b>2</b>	3	9625
<b>3</b>	3	8425
<b>4</b>	3	7225
<b>5</b>	4	6025
<b>6</b>	5	4825
<b>7</b>	6,3	3625
<b>8</b>	6,3	2425
<b>9</b>	8	1225
<b>Startovací segment (Kotvení nádrže)</b>		25

<sup>1</sup> Počet lubů- Termín označující počet řad nádrže

<sup>2</sup> Jedná se o číslování od vrchních lubů/řad (tj. 9.řada je spodní řada)

Firma Kohimex má momentálně typizované tloušťky plechů pouze 3, 4, 5, 6,3, 8 a 10mm. Tyto tloušťky byly zvoleny na základě mnohaletých zkušeností a potřeb společnosti.

Váha 8mm plechu je zhruba 200 kg, mimo-strojní manipulovatelnost s tímto plechem je velmi náročná a namáhavá. To je také jeden z dalších důvodů provádění této analýzy. Minimální tloušťka plechů pro navrhovanou variantu bude 2mm.

## 5.2 Materiály

Modifikace této nádrže bude realizována na více zvolených materiálech viz Tabulka 5.3.

**Tabulka 5.3:** Materiály použité při modifikaci

-	Označení [-]	Mez kluzu [MPa]
<b>Stávající materiál</b>	S350MC	355
<b>Požadavek firmy Kohimex</b>	S550MC	550
<b>Doporučení společnosti Arcelor Mittal</b>	S420MC	420

Firma Kohimex používá jednotný materiál pro všechny tloušťky obvodových plech, jedná se o materiál s mezí kluzu 355MPa a mezí pevnosti v tahu 510MPa. Požadavkem společnosti je provést modifikaci mimo jiné s materiálem S550.

Dále byla poptána společnost Arcelor Mittal, která dle dostupných informací, které dostala, doporučila materiál s jakostí S390, nebo S420. Materiál S390 nebude dále uvažován z důvodu malé odchylky mechanických hodnot od stávajícího materiálu.

### 5.2.1 Materiál Armstrong

Jedná se o vysoko-pevnostní materiál, se zaručenými mechanickými vlastnostmi dané oceli.

**Tabulka 5.4** Značení daných ocelí [10]

Značka korespondence	EN 10149-2: 2013	SEW 092: 1990	UNE 36090	NF 36- 231: 1992	BS 1449/1	Staré značení
<b>Armstrong™ 420MC</b>	S420MC	QstE460TM	AE440HC	E420D	HR50 F45	Soldur 420 / Profilar 460 / BSK 46
<b>Armstrong™ 550MC</b>	S550MC	(QstE600TM)	-	E560D	HR60 F55	Soldur 550

**Tabulka 5.5** Přehled mechanických vlastností daných materiálů [10]

Mechanické vlastnosti	Směr	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
<b>Amstrong™ 420MC</b>	L	420 - 520	490 - 600
	T	450 - 550	500 - 600
<b>Amstrong™ 550MC</b>	L	550 - 650	620 - 750
	T	580 - 680	630 - 750

(Pro větší zobecnění dále budeme psát pouze jako materiál S420, respektive S550.)

### 5.3 Ekonomické hledisko

Dle cen ze dne 4. 10. 2015 společnosti Arcelor Mittal byla zpracována Tabulka 5.6, která ukazuje minimální rentabilní úsporu materiálu, která se odvíjí od navýšení nákladů, respektive rozdílů cen konkrétních jakostí.

**Tabulka 5.6** Porovnání rentabilních hmotností nádrže

Materiál	Minimální rentabilní hmotnost nádrže [t]	Potřebná úspora [t]
<b>Současný materiál</b>	28,2	0
<b>S420</b>	26,7	1,4
<b>S550</b>	27,6	0,6

Dle předchozí tabulky bude dále použit pro výpočet pouze materiál S550, z důvodu lepšího poměru ceny a jakosti materiálu.



## 6 URČENÍ DEFORMAČNĚ NAPĚŤOVÝCH STAVŮ NÁDOBY

### 6.1 Vymezení MS

Mezní stav je takový stav tělesa, při němž těleso ztrácí svou funkci.

Z celé množiny MS byly vypsány pouze ty, které si přeje zadavatel práce zkontrolovat, respektive zohlednit při návrhu alternativní varianty. Jedná se o mezní stav pružnosti a mezní stav deformační stability.

#### 6.1.1 Mezní stav pružnosti

Jedná se o stav, po jehož překročení začnou vznikat nevratné makro-plastické deformace.

*Podmínka plasticity HMM: mezní stav pružnosti při monotónním zatěžování nastane, když oktaedrické napětí dosáhne mezní hodnoty [12].*

#### 6.1.2 Mezní stav deformační stability

*Je takový stav tělesa, při jehož dosažení se jeho geometrická konfigurace, která byla stabilní před dosažením mezního stavu, stává labilní a stabilní konfigurací se stává jiná geometrická konfigurace tělesa. Podle typu tělesa a charakteru jeho zatížení můžeme zde dále rozlišovat MS boulení stěn a MS ztráty stability skořepiny [13].*

- MS boulení stěn nastává většinou při namáhání tlakem a jedná se o vybočení z původní střednicové roviny
- MS stability skořepiny nastává při vyboulení pláště, neboli dochází k tak zvanému prolomení dovnitř.

### 6.2 Obecné normy a standardy používané k návrhu[1]

*Návrh konstrukce a výroba se řídí normami a standardy uvedenými pro ukázkou níže.*

#### 6.2.1 Výpočtové normy

<b>ČSN EN 1990</b>	<i>Zásady navrhování</i>
<b>ČSN EN 1991</b>	<i>Zatížení konstrukcí</i>
<b>ČSN EN 1991-1-1</b>	<i>Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitné zatížení pozemních staveb</i>
<b>ČSN EN 1991-1-4</b>	<i>Obecná zatížení – Zatížení větrem</i>
<b>ČSN EN 1991-1-6</b>	<i>Obecná zatížení - Zatížení během provádění</i>
<b>ČSN EN 1991-4</b>	<i>Zatížení konstrukcí -Zatížení zásobníků a nádrží</i>
<b>ČSN EN 1993-1-1</b>	<i>Navrhování ocelových konstrukcí- Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby</i>

**ČSN EN 1993-4-1**    *Navrhování ocelových konstrukcí- Zásobníky*

**ČSN EN 1993-4-2**    *Navrhování ocelových konstrukcí-Nádrže*

**ČSN EN 1090**        *Provádění ocelových a hliníkových konstrukcí*

### 6.2.2 Systémové standardy

#### **FM approved 1835**

*FM global je mezinárodní certifikační organizace, která vydává standardy pro pojištění majetku na základě inženýrských analýz a výpočtů, pro některé sprinklerové nádrže je vyžadován tento standard [6].*

#### **VdS (Vertrauen durch Sicherheit)**

*Mezinárodní certifikační organizace pro prevenci požárů a dalších rizik včetně ochrany proti nežádoucímu průniku. [7]*

#### **AWWA 1881**

*Největší vědecká nezisková asociace, která má za úkol správu a upravování vody, věnuje se zlepšení zdraví a ochrany životního prostředí [8]*

#### **SMK (Systém managementu kvality)**

*Jedná se o normu, která specifikuje požadavky na systém managementu kvality v organizacích, které chtějí a potřebují prokázat svoji schopnost trvale poskytovat produkty v souladu s příslušnými předpisy a požadavky zákazníků, a které usilují o zvyšování spokojenosti zákazníka. Pro stavbu šroubovaných nádrží je vyžadována minimálně ISO 9001[9].*

### 6.3 Použité bezpečnosti a dovolená napětí

Jelikož je návrh takovýchto nádob analytickým způsobem velmi náročný a komplikovaný a problematika jako taková velmi rozsáhlá, firma Kohimex dala k dispozici pouze ty součinitele a bezpečnosti, které chce, aby byly použity pro návrh.

Pro srovnání výsledků z výpočtového modelování se současným návrhem je nutno dodržet jisté náležitosti a pravidla. Tím je myšleno použití stejných bezpečností vyplývajících z eurokódů. Zde jsou vypsány hlavní použité bezpečnosti:

Dílčí součinitel spolehlivosti - únosnost šroubů a plechů v otlacení	$\gamma_{M_{2B}} := 1,25.$
Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu - únosnost průřezů	$\gamma_{M_0} := 1,1.$
Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu - únosnost průřezů při porušení	$\gamma_{M_2} := 1,25.$
Zatížení od hydrostatického tlaku (ČSN EN 1991-4, součinitel stálého zatížení)	$\gamma_{F_h} := 1,35.$
Zatížení od větru (ČSN EN 1990, proměnné nepříznivé zatížení)	$\gamma_{F_w} := 1,5.$

Mezními hodnotami pro výpočet jsou dovolené návrhové napětí a dovolené obvodové napětí.

### 6.3.1 Současná varianta

Mez kluzu současného materiálu pláště

$f_y := 350 \text{ MPa}$

, dovolené návrhové napětí<sup>3</sup>

$\sigma_{nd} := 320 \text{ MPa}$

Maximální dovolené obvodové napětí pro prvních 8 řad

$\sigma_{dt} = 245 \text{ MPa}$

Maximální dovolené obvodové napětí pro poslední řadu

$\sigma_{dt} = 270 \text{ MPa}$

### 6.3.2 Navrhovaná varianta

Jak již bylo zmíněno v 5.1 minimální tloušťka plechů navrhované varianty klesla z 3mm na 2mm. Vzhledem k faktu, že dochází ke kombinaci MKP a norem bude pro modifikovaný stav  $\gamma_{M0} := 1,3$

Maximální dovolené obvodové napětí (viz Tabulka 6.1.)

$\sigma_{dt} = 353 \text{ MPa}$

**Tabulka 6.1 Tabulka s mezními hodnotami obvodového napětí [2]**

Tloušťka plechu [mm]	Únosnost Typ III <sup>4</sup> [kN/m]	Použitý šroub [-]	Obvodové napětí <sup>5</sup> [MPa]	Únosnost Typ IV [kN/m]	Použitý šroub [-]	Obvodové napětí [MPa]
2	706	M12/13 ...8.8	353	-	-	-
2,5	883	M12/13 ...8.8	353	-	-	-
3	1060	M12/13 ...8.8	353	-	-	-
3,5	1237	M12/13 ...8.8	353	-	-	-
4	1297	M12/13 ...8.8	324	1413	M12/13 ...8.8	353
4,5	-	-	-	1590	M12/13 ...8.8	353
5	-	-	-	1767	M12/13 ...8.8	353
5,5	-	-	-	1943	M12/14 ...10.9	353
6	-	-	-	2120	M12/14 ...10.9	353
6,5	-	-	-	2297	M12/14 ...10.9	353
7	-	-	-	2474	M12/14 ...10.9	353
7,5	-	-	-	2650	M12/14 ...10.9	353
8	-	-	-	2827	M12/14 ...10.9	353

Dále se při návrhu normami analyzuje osově napětí nádrže. Toto napětí má větší vliv na vodorovné, než-li na svislé spoje. Rozteče šroubů vodorovného spoje jsou dány převážně zkušenostmi s těsností (netěsností) spoje. Z tohoto důvodu je osově napětí vždy daleko menší, než obvodové a také vždy daleko menší, než dovolené/návrhové osově napětí. Tudíž nebude toto napětí v práci analyzováno.

<sup>3</sup> (se zohledněním  $\gamma_{M0} := 1,1$ )

<sup>4</sup> Jedná se o maximální obvodovou sílu, typ spoje je dán konstrukčními zásadami firmy Kohimex

<sup>5</sup> Jedná se o maximální dovolené obvodové napětí, s použitými bezpečnostmi  $\gamma_{M2}$  a  $\gamma_{M2B}$

## 7 METODY ŘEŠENÍ

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, k řešení tohoto problému je možno použít analytické řešení. Toto je možno chápat jako provádění výpočtů buď klasickou teorií pružnosti, nebo již zmíněnými normami. Výpočet na základě vzorců z pružnosti a pevnosti, může být velmi složitý a také nemusí, v určitých případech, zcela odpovídat skutečnosti. Výpočty na základě norem, kde jsou doporučené postupy, jsou zobecněné pro různé typy případů a ve většině případů dochází k předimenzování navrhovaného výrobku. Dalším možným způsobem řešení takového problému je výpočtové modelování, kterým je možno efektivně řešit daný problém.

Jelikož systém obsahuje velmi složitou dílčí geometrii, je vhodné použít právě výpočtové modelování. Modely, je možno mimo jiné, rozdělit na dílčí modely geometrie, materiálu, vazeb a zatížení. V dnešní době nejvíce využívanou metodou pro řešení takových problémů je metoda konečných prvků. MKP je v současnosti implementovaná v řadě výpočtových komerčních systémů (např.: ABAQUS[14], ANSYS[15], RFEM[16] apod.

### 7.1 Použitý software

Společnost Kohimex (respektive její konstruktérská část) v současné době kromě norem také využívá profesionální program pro statické výpočty MKP, RFEM[16]. Dále také disponuje licencemi pro programy jako např.: INVENTOR [17], AUTOCAD [18].

K řešení problému v této diplomové práci byl použit software ANSYS, INVENTOR, AUTOCAD a MICROSOFT OFFICE, jehož licence je k dispozici na ÚMTMB[21]. Z programů INVENTOR a AUTOCAD, byla z dodaných podkladů upravena geometrie, která následně posloužila jako vstup do programu ANSYS.

ANSYS patří dlouhodobě mezi nejpoužívanější a nejrozšířenější MKP systémy v České Republice. Celý systém obsahuje také řadu užitečných nástrojů pro tvorbu modelu geometrie a MKP sítě. Software umožňuje efektivním způsobem zadávat okrajové podmínky a také umožňuje provádět analýzy na vysoké úrovni. Software ANSYS jako takový je složen ze dvou základních prostředí, Mechanical APDL a WORKBENCH. ANSYS Mechanical APDL je starší prostředí, s rozsáhlým množstvím funkcí a možností výpočtu, ovšem není příliš uživatelsky příjemný a přehledný. Druhé novější prostředí, ANSYS Workbench, je sice daleko uživatelsky přívětivější, ale neobsahuje takové možnosti jako prostředí APDL.

## 7.2 Úroveň výpočtového modelu

Při tvorbě výpočtového modelu byla snaha se co nejvíce přiblížit skutečnosti. Proto bylo důležité se držet co nejvíce výkresové dokumentace včetně jejích dílčích náležitostí (princip montáže apod.). Ovšem je také nutno zmínit, že bylo nutné zvážit podstatnost některých dílů, respektive prvků této nádrže na výsledky výpočtového modelování. Na základě těchto úvah byl sestaven seznam věcí, které ve výpočtovém modelování nejsou zohledněny.

- **Startovací segment**  
Jelikož se startovací segment zabetonovává, v tomto místě je předepsáno vetknutí.
- **Většinu montážních otvorů**  
Jedná se o prvky, které jsou převážně prováděny na stavbě, jejich umístění je nahodilé a málo časté. Jedná se převážně o ukotvení elektrických kabelů, PVC trubek apod.
- **Příruby a jiné technologie**  
Tyto díly nádrže by měly být navrhovány a zkonstruovány na základě mnohaletých zkušeností a jejich funkce by neměla nijak oslabovat plechy nádrže.
- **Tmel**  
Jak již bylo zmíněno, tmel, je aplikován v nádrži převážně proto, aby byla zajištěna „vodotěsnost“ nádrže. Její modelování by bylo velmi náročné a výsledek by příliš neovlivnil. Normy tento prvek také neuvažují.
- **Diskretizace větrných výztuh**  
Dle požadavku fy KOHIMEX, byly stávající větrné výztuhy nahrazeny jinými se srovnatelnými vlastnostmi.
- **Vliv média na povrchovou úpravu veškerých dílů**  
Médium může mít jisté degradační účinky na díly nádrže, ovšem jedná se spíše o konstrukční problém. Veškeré díly jsou buď lakovány, žárově pozinkovány, nebo obsahují komaxitový nástřík. Tyto zmíněné povrchové ochrany by měly být dostatečné a zajistit, aby nádrž jako celek vydržela mnohem více, než je zaručená životnosti nádrže.

Výpočtový model je rozdělen a pojmenován na dvě základní části podle způsobu aktivace:

- Výpočtový model provozního zatížení
- Výpočtový model zatížení větrem

Výpočtové modely se dále dělí na tyto dílčí modely:

- **model geometrie,**
- **model materiálu,**
- **model vazeb a zatížení**

## 8 VÝPOČTOVÝ MODEL PROVOZNÍHO ZATÍŽENÍ NÁDOBY

Model provozního zatížení byl složen ze dvou dílčích zatížení a to:

- Zatížení vlastní tíhou
- Zatížení hydrostatickým tlakem

Oba tyto typy zatížení sloužili společně jako vstup do výpočtu provozního zatížení. Nejdříve byla provedena analýza současného stavu, a následně na základě výstupů byla provedena modifikace.

### 8.1 Model geometrie

Je nutné zmínit, že některé menší tloušťky plechů (3mm) se někdy nezakružují. Je-li modelován již zakružený plech, je možné se dopustit jisté výpočtové chyby. Napětí vzniklé zakružením plechu je možno vyjádřit následovně [20]:

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} = \frac{-M_o}{E \cdot J_y} \gg M_o = E \cdot J_y \cdot \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} \right) \quad (8.1)$$

, kde pro obdélníkový průřez  $J_y = \frac{H^3 \cdot B}{12} = \frac{3^3 \cdot 2500}{12} = 5625 \text{ mm}^4$  [19],

Youngovým modulem  $E = 210000 \text{ MPa}$ ,

Poloměr  $R = D/2 = 10163 \text{ mm}$ ,

$$\frac{1}{\rho} = 0, H = t, \text{ tedy:}$$

$$M_o = 210000 [\text{MPa}] \cdot 5625 [\text{mm}^4] \cdot \left( \frac{1}{10163 [\text{mm}]} \right) = 116230 \text{ Nmm} \quad (8.2)$$

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{B \cdot H^2}{6}} = \frac{116230 [\text{Nmm}]}{\frac{2500 [\text{mm}] \cdot 3^2 [\text{mm}]}{6}} = 31 \text{ MPa} \quad (8.3)$$

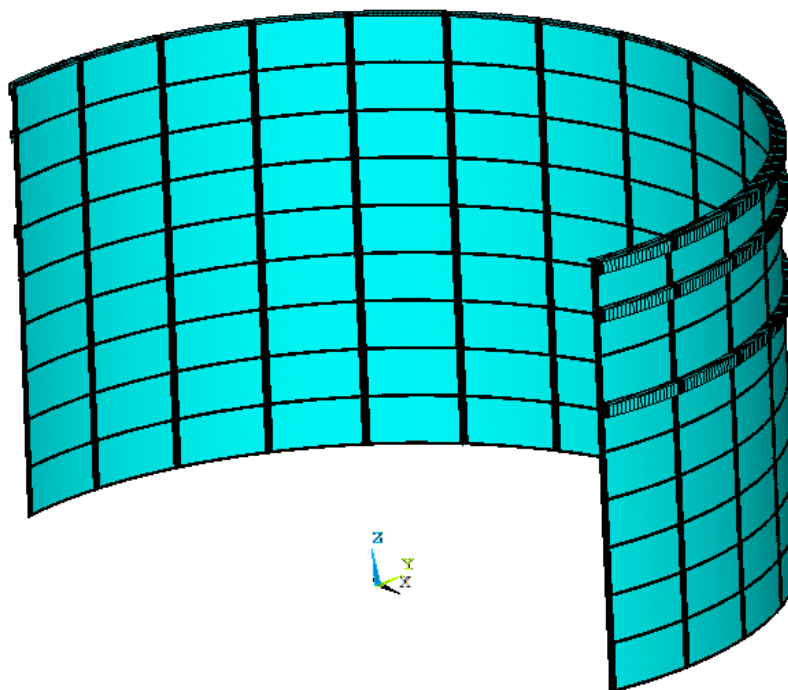
Z předešlého je zřejmé, že ohnutí rovného plechu vyvolá v plechu napětí až **31MPa**. Je nutno zdůraznit, že vzhledem k zadané geometrii se jedná o maximální hodnotu. Jelikož norma tento výpočet přímo nevyžaduje, tak ani v této práci nebude dále uveden.

### Postup tvorby geometrie nádrže

1. Vytvoření geometrie plechu
2. Tvorba první řady
3. Rozkopírování řad R2-R9
4. Tvorba HÚ
5. Tvorba VV
6. Sešroubování nádrže
  - Sešroubování plechů mezi sebou v jedné řadě
  - Sešroubování plechů R9 a HÚ
  - Sešroubování řad
  - Sešroubování plechů a VV
7. Provedení kontaktu mezi jednotlivými díly nádrže

Na následujícím obrázku je možno vidět finální model geometrie.

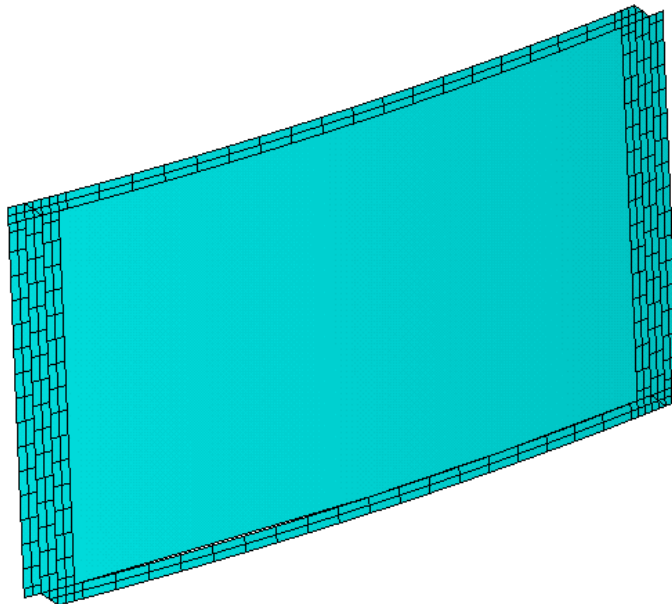
1  
AREAS  
TYPE NUM



Obrázek 8.1 Model geometrie nádrže

Jak již bylo zmíněno dříve, hlavním prvkem této nádrže je plech pláště nádoby, jehož model je možno vidět na následujícím obrázku 8.2.

1  
REFS  
TYPE. NUM



Obrázek 8.2 Model geometrie plechu

## 8.2 Model materiálových vlastností

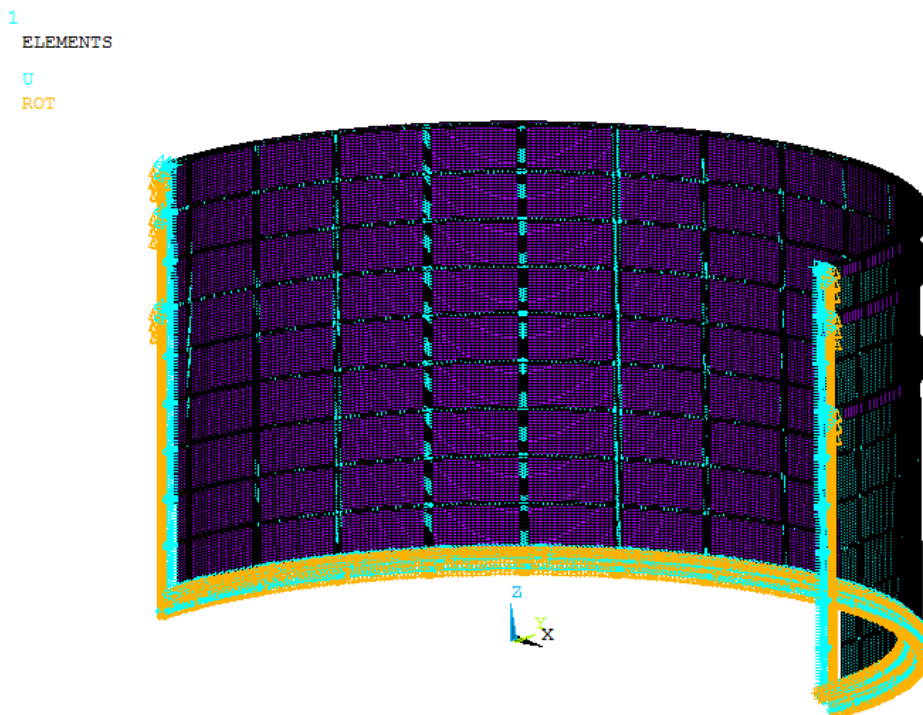
Všechny prvky řešených soustav jsou modelovány homogenním lineárně pružným izotropním modelem materiálu (Hookovský model), jenž je určen Youngovým modulem  $E$  [MPa] a Poissonovým číslem  $\mu$  [-]. Byla zde volena ocel,  $E=210 \text{ GPa}$ ,  $\mu=0,3$   $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ .

Dalším důležitým parametrem oceli je mez kluzu. Mez kluzu současného plechu je 350MPa. Mez kluzu pro navrhovanou variantu je 550MPa. Mez kluzu výztuh je 235 Mpa.



### 8.3 Model vazeb

Model vazeb (obrázek 8.4) se skládá z vetknutí spodní hrany a symetrických okrajových podmínek.



Obrázek 8.3 Model vazeb

#### 8.3.1 „Vetknutí“

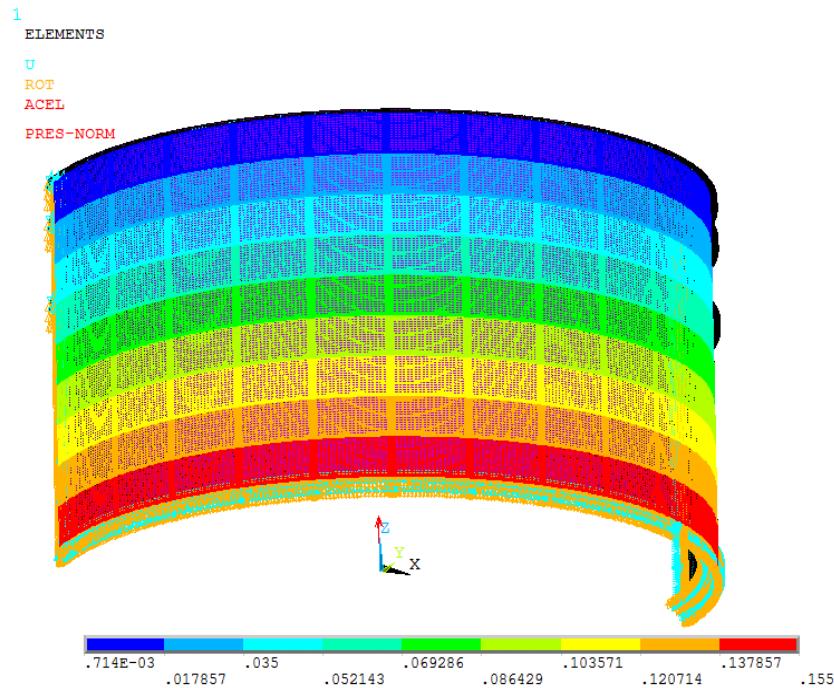
Na spodní hraně nádrže byla aplikována podmínka „vetknutí“, tím bylo simulováno zalití spodní hrany betonem. Tato podmínka zajišťuje, že v uzlových bodech bude zamezeno všem posuvům i rotacím.

#### 8.3.2 Symetrické okrajové podmínky

Tato okrajová podmínka byla předepsána na uzlové body, které leží v rovinách symetrie. Tato OP zajišťuje, že uzly mají nulové posunutí v normálovém směru k rovině symetrie a nulové natočení k osám ležícím v rovině symetrie.

## 8.4 Model zatížení

Model zatížení se skládá ze zatížení hydrostatickým tlakem spolu se zohlednění vlastní tíhy nádrže.



Obrázek 8.4 Model vazeb a zatížení

### 8.4.1 Zatížení hydrostatickým tlakem

Ukládaným médiem uvnitř této nádrže je kejda. Jedná se o kapalinu, jejíž hustota se blíží hustotě vody. Hustota kejdy je přibližně **1080 kg/m<sup>3</sup>**.

Bylo tedy potřeba vypočítat, v závislost tlaku na výšce sloupce kapaliny. Tato závislost je dána následujícím vztahem.

$$p = h \cdot \rho_k \cdot g, \quad (8.4)$$

kde **h** výška sloupce kapaliny [m] (maximální hodnota je výška nádrže),  
 **$\rho_k$**  hustota kejdy [kg/m<sup>3</sup>],  
**g** hodnota tíhového zrychlení [m/s<sup>2</sup>]. Tedy po dosazení.

$$p = h \cdot \rho_k \cdot g = 10,85 [m] \cdot 1080 [kg \cdot m^{-3}] \cdot 9,81 [m \cdot s^{-2}] = 0,115 MPa \quad (8.5)$$

Z (8.5) vyplývá, že daná výška dané kapaliny vyvodí tlak 0,115MPa.

Dále bylo potřeba vynásobit tuto hodnotu tlaku součinitelem  $\gamma Fh = 1,35$ .

$$p_k = p \cdot \gamma Fh = 0,115 \text{ MPa} \cdot 1,35 = 0,155 \text{ MPa} \quad (8.6)$$

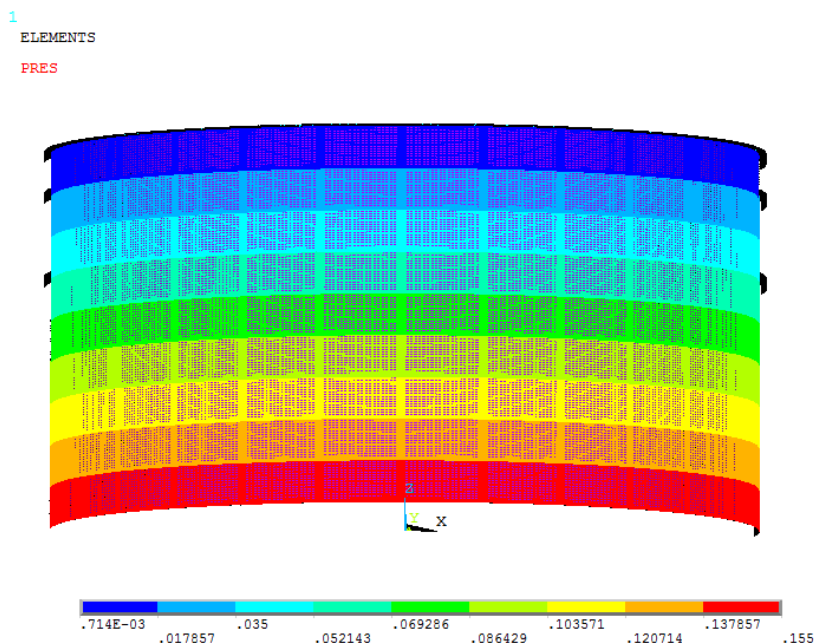
Médium vyvodí na nádrži tlak 0,115MPa, ale při zohlednění koeficientu bezpečnosti, bude do výpočtu zadáván  $p_{\max}=0,155\text{MPa}$ .

**Tabulka 8.1:** Tlak odpovídající výšce sloupce kapaliny

Výška sloupce kapaliny [m]	Tlak odpovídající dané výšce [MPa]
10,85	0,155
9,65	0,138
8,45	0,121
7,25	0,104
6,05	0,087
4,85	0,069
3,65	0,052
2,45	0,035
1,25	0,018

Jelikož se jedná o velmi rozsáhlou soustavu, z důvodu dobré podmíněnosti soustavy, byl zadáván tlak postupně, tj. po řadách. Tím bylo simulováno reálné napouštění nádoby, viz Tabulka 8.2.

Zatížení nádoby pouze hydrostatickým tlakem je vidět na následujícím obrázku.



**Obrázek 8.5** Zatížení nádoby hydrostatickým tlakem

#### 8.4.2 Zatížení vlastní tíhou

Bylo nutné zohlednit vlastní tíhu nádrže, což znamenalo aplikovat na model tíhové zrychlení ( $g=9810 \text{ mm.s}^{-2}$ ). Tíhové zrychlení bylo automaticky aplikováno na celý model nádrže.

#### 8.5 Tvorba sítě

Každé tenkostěnné těleso, musí splňovat následující podmínku [22]:

$$\frac{b}{t} > 10, \quad (8.7)$$

kde  $b$  charakteristický rozměr tělesa (většinou šířka, průměr), a

$t$  tloušťka.

Vzhledem k rozměrům plechů 2500x1250mm a tloušťkám pohybujících se od 3-8mm, je zřejmé, že se opravdu jedná o tenkostěnné těleso, které může být bez jakýchkoliv výhrad diskretizováno *SHELL* prvkem.

##### 8.5.1 Použité prvky

Nádrž byla rozdělena na dílčí části, které byly posléze diskretizovány. Plášťové plechy a výztuhy byly diskretizovány prvkem *SHELL 181*. Šrouby nádrže byly diskretizovány prvkem *BEAM 188*. Dalším prvkem tohoto modelu byl *COMBIN 39*, který napodobuje kontakty plechů.

##### SHELL 281

Jedná se o 8uzlový (kvadratický) element se šesti stupni volnosti v každém uzlu. Hlavním vstupním parametrem do tohoto typu prvku jsou tloušťky. Přiřazení tlouštěk bylo od spodních řad, tj. spodní řada měla číslo 1, a vrchní 9. Výztuhy nádrže pak měly označení 10 a 11. Počet prvků byl zvolen vždy 2 prvky na čáru (linu) viz 8.5.3.

Tabulka 8.2 Číselné označení průřezů a jejich tloušťky

Section (Řada <sup>6)</sup> )	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10 (HVU)	11 (VV)
Tloušťka [mm]	8	6,3	6,3	5	4	3	3	3	3	10	10

##### BEAM 188

Jedná se o 2 uzlový nosníkový (prutový) 3D prvek se šesti stupni volnosti. Tento prvek je vhodný na modelování velkých deformací. Hlavním parametrem tohoto prvku byl jeho kruhový průřez, se zadaným poloměrem 6mm ( $\varnothing 12\text{mm}$ ).

<sup>6</sup> Jedná se o číslování od spodní řady.

## COMBIN 39

Tento nelineární dvou-uzlový prvek slouží k diskretizaci čár (**LINE**), pružinami.

### 8.5.2 Nastavení řešiče

Daná úloha byla řešena jako statická strukturální úloha. Jelikož se jedná o rozsáhlou úlohu s velkými přetvořeními/deformacemi, musel být tento fakt zohledněn také při nastavení řešiče.

### 8.5.3 Konvergence sítě

Byla provedena konvergence sítě, jejíž parametrem byl model s 1, 2 a 4 prvky na čáru. Výsledky této analýzy, respektive jejich rozdíl, se pohyboval pouze v malých odchylkách (do 6%). Výsledky z lineárního skořepinového prvku, nebyly zcela vhodné z důvodu nespojitosti napětí. Na základě výsledků z konvergence sítě (Tabulka 8.3) bylo provedeno rozhodnutí, že model se dvěma prvky na linu bude pro výpočet dostatečný.

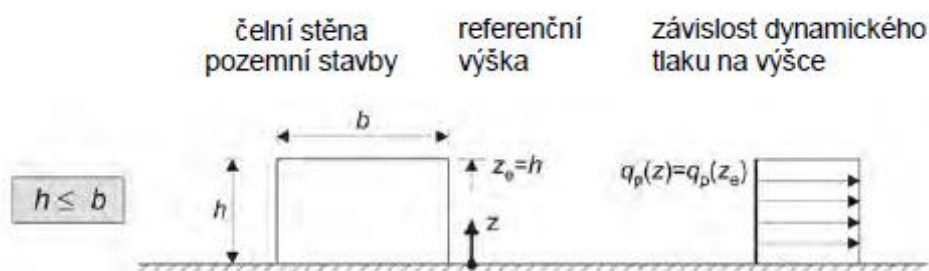
**Tabulka 8.3 Napětí pro různé prvky**

Redukované napětí HMIH	Konvergence sítě-plotna							
	Lub	SHELL 181 1 prvek	SHELL 281 1Prvek	Rozdíl	SHELL 281 2Prvky	Rozdíl	SHELL 281 4Prvky	Rozdíl
1		52	53	1%	59	6%	60	1%
2		127	127	0%	135	3%	135	0%
3		172	167	-1%	182	4%	184	1%
4		224	230	1%	235	1%	237	0%
5		219	230	3%	234	1%	238	1%
6		218	231	3%	235	1%	237	0%
7		208	222	3%	226	1%	230	1%
8		237	253	3%	257	1%	259	0%
9		235	237	0%	239	0%	240	0%

Výpočtový model provozního zatížení se skládal ze 49575 ploch a obsahoval 448372 elementů. Z předešlého je zřejmé, že se jedná o rozsáhlou úlohu.

## 9 VÝPOČTOVÝ MODEL ZATÍŽENÍ VĚTREM

Po provedení analýzy současného stavu a provedení modifikace, je nutno ověřit zda tato alternativní varianta nádrže vydrží také na zatížení větrem. Pro tento výpočet byl využit jeden z mnoha produktů *ANSYSU*, jménem *FLOTTRAN CFD*. Tato nástavba se dá použít pro analýzy laminárního nebo turbulentního proudění, termické analýzy a mnoho dalších. Toto prostředí umí analyzovat jak dvourozměrné (2D), tak i trojrozměrné (3D) proudění. Vzhledem k rozsáhlosti úlohy a omezení některých licencí bude v tomto prostředí využito pouze dvourozměrné úlohy. Na následujícím obrázku (Obrázek 9.1) je vykreslena závislost dynamického tlaku na výšce. Obecně je proudění vzduchu funkcí nejen úhlu, ale i výšky. Ovšem z obrázku 9.1 vyplývá, že norma umožňuje, pro určité poměry výšky a průměru obtékaného tělesa, použít po výšce konstantní hodnoty tlaku působící na nádrž.



Obrázek 9.1 Závislost dynamického tlaku na výšce [26]

Jelikož výška ( $h$ ) analyzované nádrže je menší než průměr ( $b=D$ ) a nádrž tímto splňuje podmínku z předchozího obrázku. Tlak působící na nádrž je tedy po výšce konstantní. Tento fakt umožňuje pro zjednodušení použít dvourozměrnou analýzu.

Hlavním důvodem provádění této analýzy je to, že je nutné zjistit rozložení tlaku po stěně této válcové nádoby. Toto rozložení tlaku bude po určitých úpravách vloženo (aplikováno) do předchozí statické analýzy. Kontrola na zatížení „větrem“ se vždy provádí na prázdné nádrži, tj. bez media. Při tomto stavu je totiž nejvíce ovlivněna stabilita nádrže.

Jelikož byla zvolena 2D analýza, není možné dostat žádnou informaci o chování vzduchu uvnitř nádrže. Budeme tedy předpokládat, že pokud nebude nádrž plně napuštěná, z bezpečnostních důvodů bude přes tuto nádrž přehozena plachta, nebo bude jiným způsobem zamezeno vniknutí větru dovnitř nádoby.

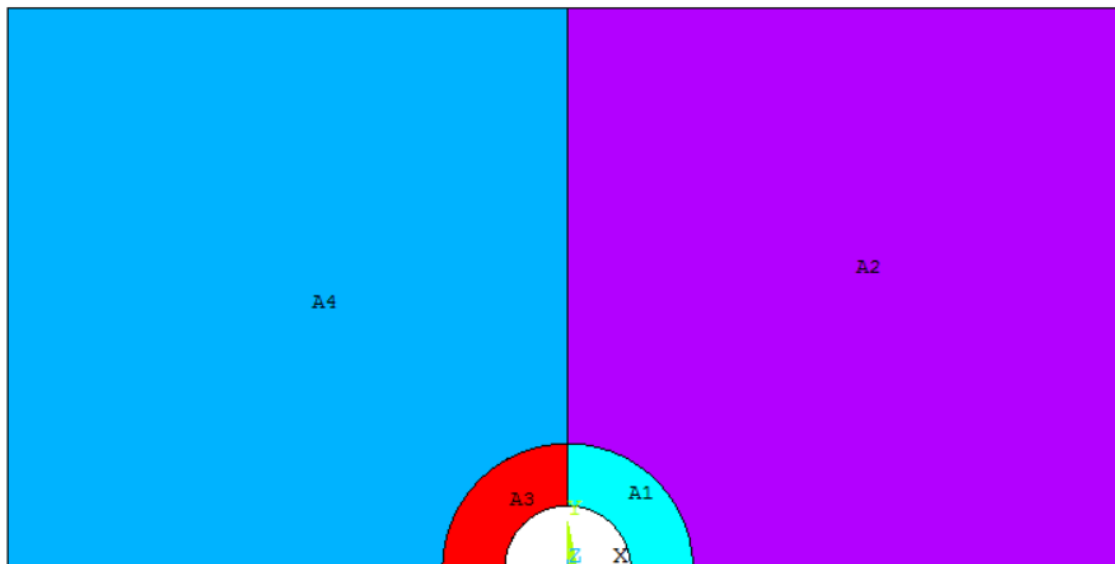
### 9.1 Model geometrie

Z důvodu možné horší konvergence výpočtu bylo vhodné využít symetrii. Nejdříve byl tedy vytvořen obdélník<sup>7</sup>, který nahrazuje okolí nádrže. Následně byla v levém dolním rohu tohoto obdélníku vytvořena kruhová výseč. Aby byly výsledky použitelné je nutné, aby rozměry obdélníku byly mnohonásobně větší než rozměry nádrže. Dále z důvodu použití modelu turbulence, který vyžaduje zhuštění sítě v okolí obtékaného tělesa, byla vytvořena další kruhová výseč v blízké vzdálenosti od nádrže.

<sup>7</sup> Respektive čtverec 90x90 [m].



Po vytvoření sítě byly tyto plochy „ozrcadleny“ podle osy  $X$ . Z důvodu symetrického chování proudícího vzduchu je vytvořený  $\frac{1}{2}$  model dostačující.



Obrázek 9.2 Model geometrie

## 9.2 Model materiálu

V **CFD** analýze je možno zadat přímo o jakou „kapalinu“ se jedná. Jelikož byl model v metrech, byl tedy vybrán model materiálu AIR-SI<sup>8</sup>. Vlastnosti vzduchu byly přiřazeny pro hustotu a viskozitu.

Dále bylo nutno rozhodnout, zda se jedná o turbulentní, nebo laminární proudění. Toto rozhodnutí bylo provedeno na základě Reynoldsova čísla [-].

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad (9.1)$$

,kde  $D$  průměr [m],  
 $\nu$  kinematická viskozita vzduchu ( $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) a  
 $v$  je rychlost větru ( $v=25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  viz 9.3).

Tedy konkrétně pro tuto úlohu:

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu} = \frac{20,330\text{m} \cdot 25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}} = 41535714 \quad (9.2)$$

<sup>8</sup> Jedná se o model v jednotkách soustavy SI.

Limit pro laminární proudění je přibližně  $Re_k=2320$ . Na základě předchozího, nebude tato úloha dále řešena pro laminární proudění, ale pro turbulentní proudění.[23]

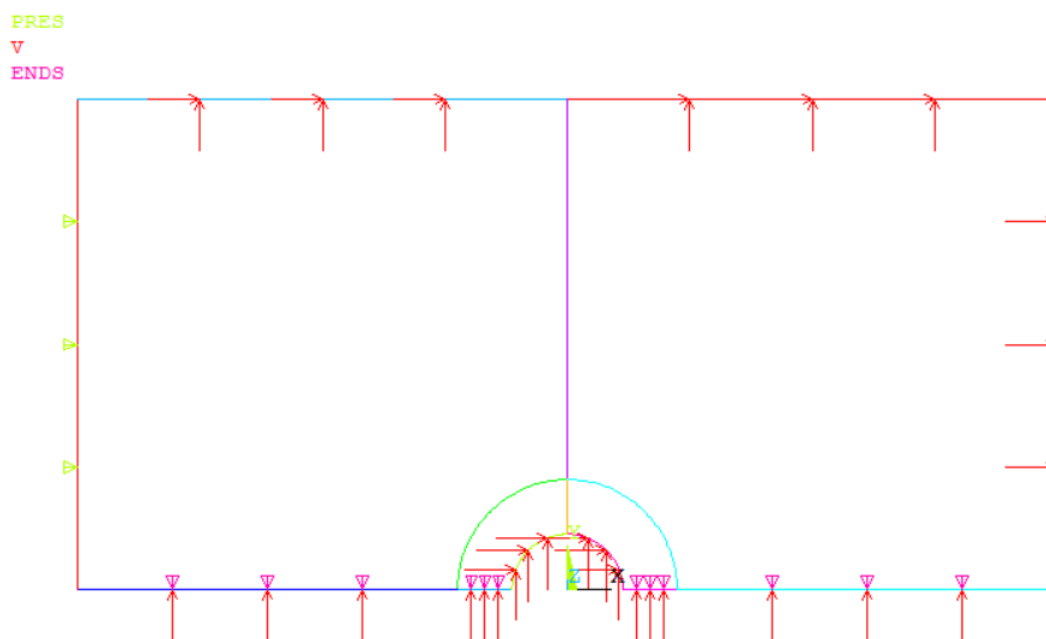
### 9.2.1 Model turbulence

Na základě rozhodnutí, že se jedná o turbulentní proudění, byl zvolen model turbulence pod názvem ***SHEAR STRESS TRANSPORT (SST)***. Tento model kombinuje model turbulence k-omega a K-epsilon.

### 9.3 Model zatížení a počátečních podmínek

Model počátečních podmínek a zatížení byl vytvořen z modelu geometrie doplněním o počáteční podmínky. Obtékání nádrže vzduchem bylo simulováno tak, že byl uměle vytvořený „větrný tunel“, ve kterém byla umístěna nádrž. Vzduch obtéká nádrž směrem zprava do leva, to znamená, že na pravou stranu byla aplikována počáteční rychlost větru. (tato hodnota musí být v souladu s normami, viz Obrázek 0.1).

V souladu s předchozím byla tedy zvolena počáteční hodnota rychlosti větru  $VX=25m\ s^{-1}$ . Obrázek 9.3 schématicky znázorňuje model počátečních podmínek a zatížení.



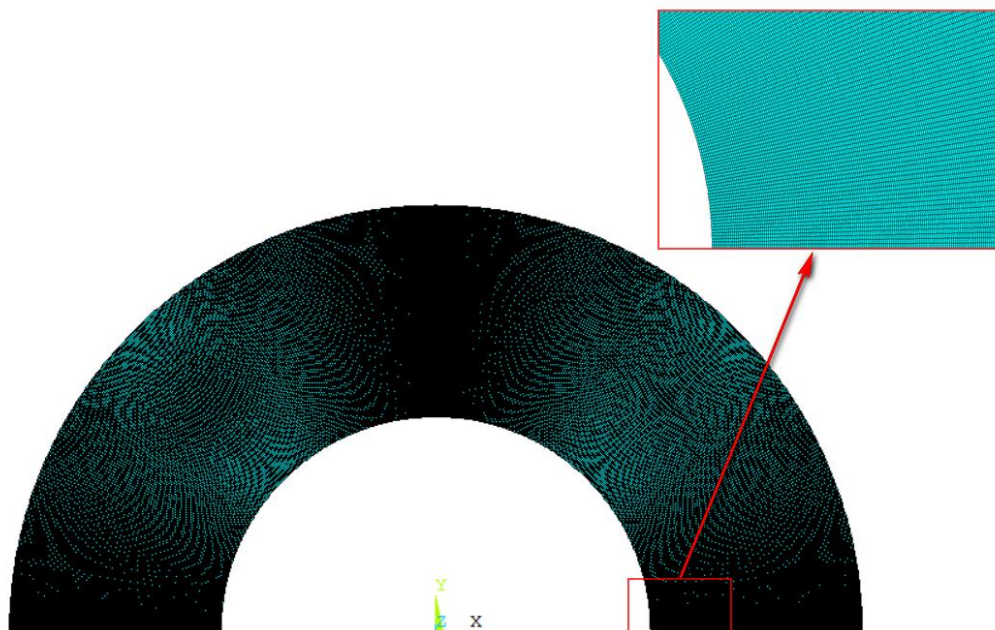
Obrázek 9.3 Model vazeb a zatížení



## 9.4 Tvorba sítě

Pro diskretizaci tohoto modelu byl zvolen prvek FLUID 141. Jedná se o rovinný prvek sloužící k modelování přechodového nebo v rovnovážného stavu tekutin, nebo tepelných systémů.[29]

Jak již bylo zmíněno v 9.1 a 9.2, použitý turbulentní model vyžaduje zjemnění sítě v oblasti nádrže. Jak lze vidět na následujícím obrázku, musela být použita opravdu hustá síť.



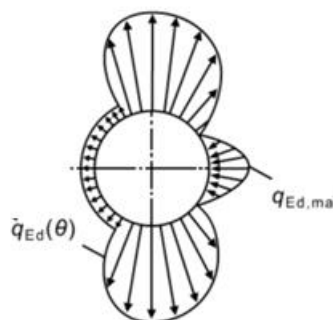
Obrázek 9.4 Detail mapované sítě v oblasti nádoby

### 9.4.1 Nastavení řešiče a konvergence sítě

Pro vybraný turbulentní model je nutné mít velmi hustou síť v okolí nádrže. Pro dané nastavení řešiče, byla provedena konvergence sítě. Pro danou síť byl model tvořen **171702 elementy**.

## 9.5 Prezentace a analýza výsledků CFD analýzy

Po provedení analýzy bylo vykresleno rozložení tlaku v okolí nádrže. Předpokládané rozložení tlaku dle eurokodů, působící na kruhovou nádobu je vykresleno na obrázku 9.5 a výsledek řešení analýzy je vykreslen na obrázku 9.6.



Obrázek 9.5 Rozdělení tlaku pro válce s kruhovým průřezem [25]

NODAL SOLUTION

STEP=1

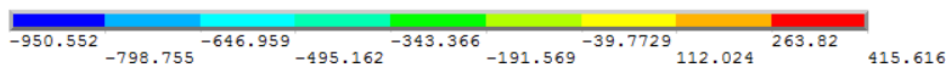
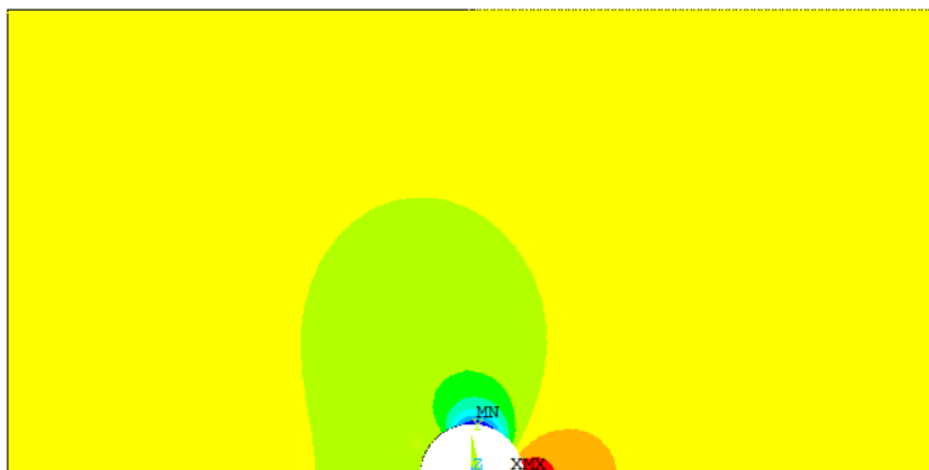
SUB =1

PRES (AVG)

RSYS=0

SMN =-950.552

SMX =415.616



Obrázek 9.6 Rozložení tlaku v okolí nádrže

Z předchozích obrázků lze předpokládat, že okolí nádrže, je umístěno v dostatečné vzdálenosti od nádrže, jelikož nijak neovlivňuje rozložení tlaku. Obrázek 9.5 a obrázek 9.6 vykazují jistou shodu.

### 9.6 Zpracování výsledků z CFD analýzy

Bylo nutné získat závislost tlaku na úhlu. Dále byly hodnoty tlaku také vynásobeny potřebnou bezpečností  $\gamma F_w$  (Viz 6.3) a upraveny tak, aby byly aplikovatelné do statické strukturální analýzy.

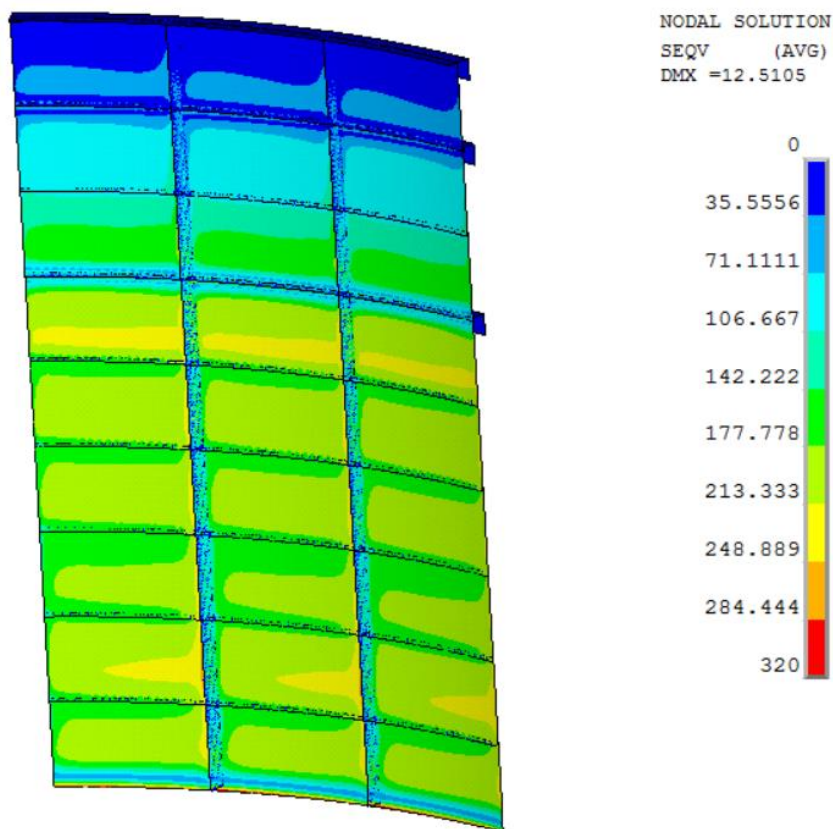
## 10 PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

### 10.1 Analýza současného stavu

Nejdříve bylo nutné otestovat výsledky na současném stavu nádrže. Analyzovanými veličinami byly ekvivalentní (redukované) napětí podle podmínky **HMH**, **obvodové napětí** a následné ověření, respektive kontrola na zatížení větrem, zda nádrž vyhoví i **MS deformační stability**. Kontrola na zatížení větrem se provádí vždy při prázdné nádrži.

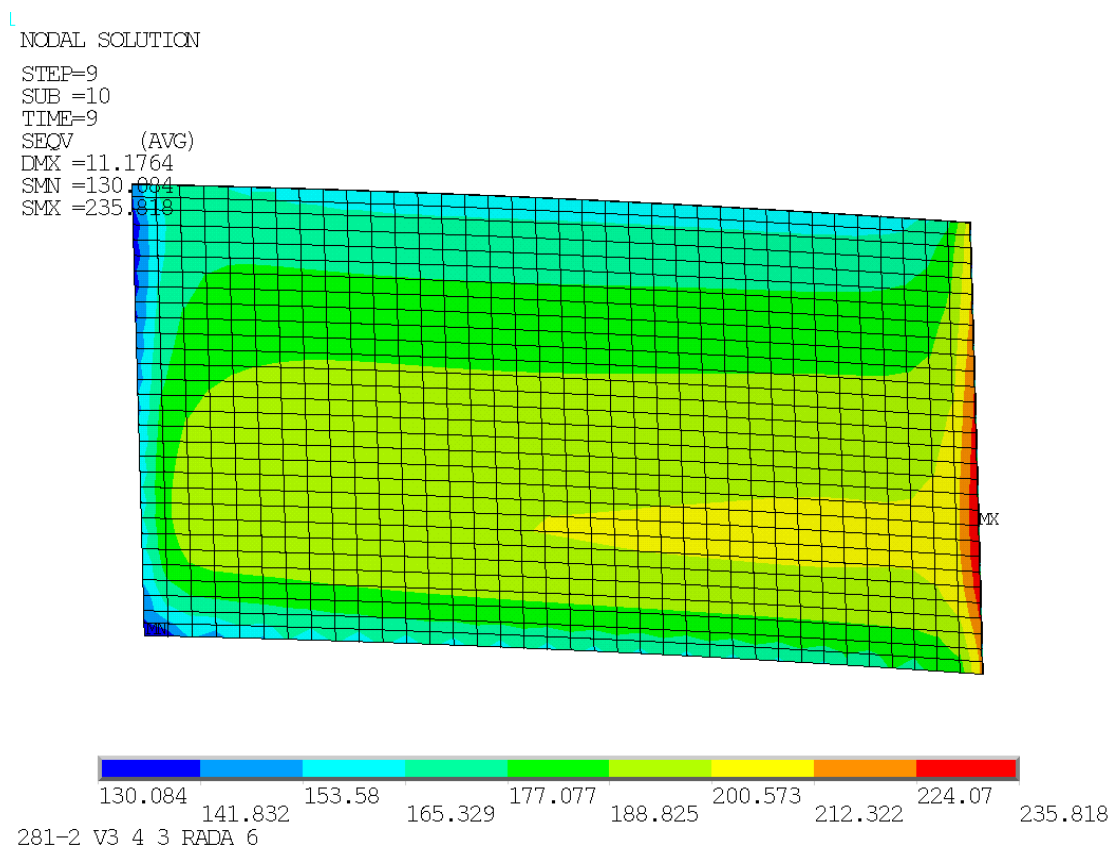
#### 10.1.1 Ekvivalentní napětí podle podmínky HMH

Nejdříve bylo vykresleno redukované napětí podle podmínky HMH. Pro přehlednost byly „vyselektovány“ elementy pouze tří řad plechů a upravena barevná stupnice na hodnoty 0 až 320MPa, což odpovídá dovolenému návrhovému napětí pro mezní stav pružnosti. Vybraný úsek s upraveným rozpětím hodnot je vykreslen na následujícím obrázku.



Obrázek 10.1 Redukované napětí od zatížení mediem

Poté byly vybrány jednotlivé plechy. Z těchto plechů byly odebrány oblasti s nespojitostmi od singularit a podobných nežádoucích koncentrátorů. Zbylá oblast byla pojmenována jako **plotna** plechu. Jedná se o oblast bez uzlů se šrouby a pružinami. Na následujícím obrázku je vykreslena takováto oblast.



**Obrázek 10.2 Redukované napětí na plotně 6. lubu**

Jak již bylo zmíněno takto byly vyselektovány postupně všechny plechy (lub 1-9). Maximální hodnoty redukovaného napětí byly zapsány do následující tabulky 10.1. Z těchto hodnot byly dále vypočteny hodnoty využitelnosti materiálu a rezervy vůči dovolenému napětí. Využitelnost materiálu byla vypočtena jako poměr redukovaného napětí a dovoleného návrhového napětí. Dopočet využitelnosti materiálu do 1 (100%) je rezerva vzhledem k dovolenému napětí.

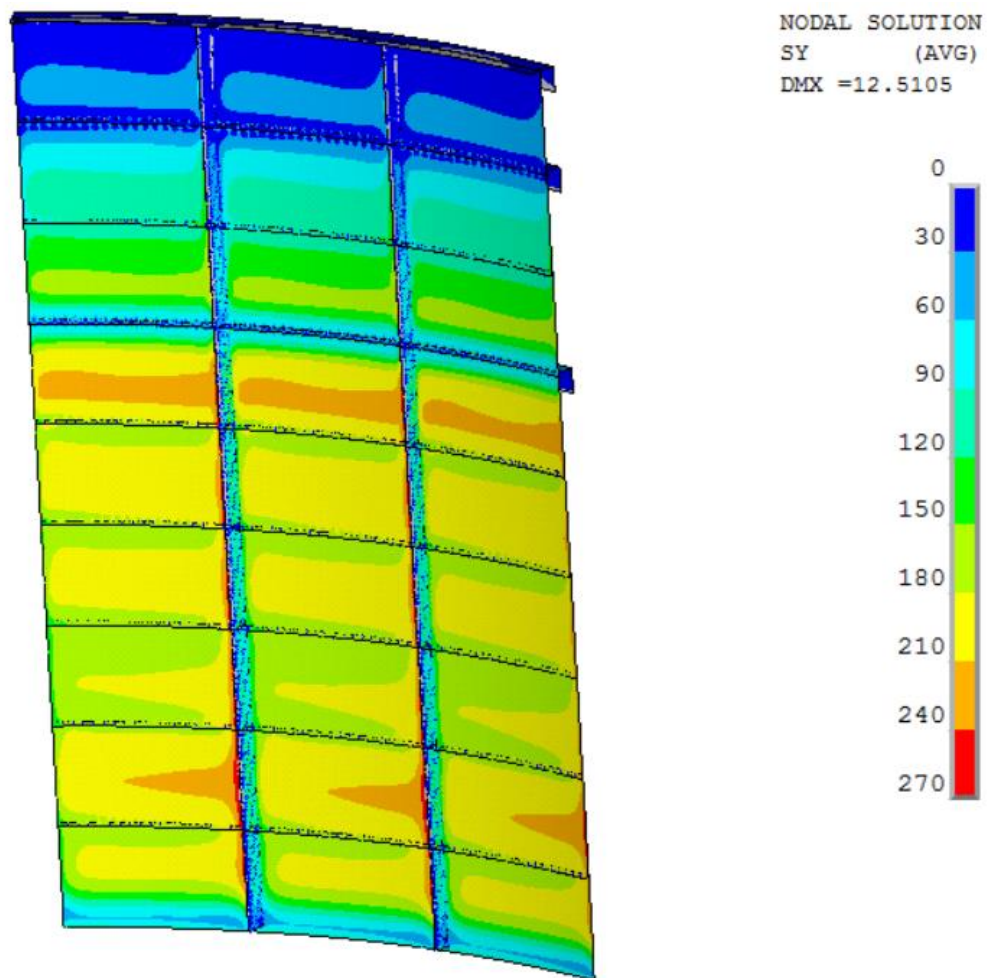
**Tabulka 10.1 Redukované napětí a využitelnost materiálu**

Současná varianta				
Lub [-]	Tloušťka [mm]	Redukované napětí [MPa]	Rezerva	Využitelnost
1	3	56	82%	18%
2	3	135	58%	42%
3	3	182	43%	57%
4	3	235	26%	74%
5	4	234	26%	74%
6	5	236	26%	74%
7	6,3	226	29%	71%
8	6,3	257	19%	81%
9	8	239	25%	75%

Z předchozí tabulky vyplývá, že využitelnost materiálu se pohybuje od **18-81%**, přičemž nejvíce se hodnoty pohybují kolem **75%**. Hodnota využitelnosti materiálu pro první a druhou řadu je menší z důvodu současné minimální používané tloušťky 3mm.

### 10.1.2 Obvodové napětí

Další analyzovanou veličinou bylo obvodové (tečné) napětí. Stejně jako v minulém případě, byly vybrány 3 řady plechů. Následně bylo opět změněno rozpětí hodnot napětí na **270MPa**, což odpovídá hodnotě dovoleného obvodového napětí pro spodní řadu. Výsledek příkazů lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 10.3 Obvodové napětí

Z předchozího obrázku vyplývá, že nejvíce je namáhána čtvrtá a osmá řada.



Pro ověření výsledků je možné použít **LAPLACEOVŮV** vztah [22].

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_t}{r} = \frac{p}{t}, \quad (10.1)$$

kde  $\sigma_m$  meridiánová složka napětí  
 $\sigma_t$  tečná složka napětí  
 $r_m$  meridiánový poloměr ( $r_m=0$ )  
 $r$  poloměr nádrže

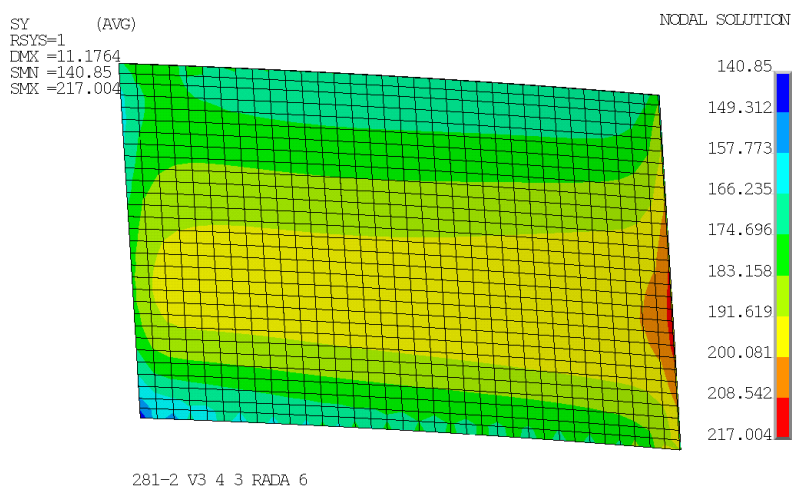
Jedná se o vztah, který slouží k určení napjatosti pro membránové (bezmomentové) skořepiny. Analyzovaná nádrž sice nesplňuje všechny podmínky membránových skořepin, jelikož vazby neumožňují radiální posuv a také jsou zde výztuhy pláště, které mohou vyvolávat momenty. Avšak v dostatečné vzdálenosti od těchto prvků můžeme tyto vlivy zanedbat.

Tedy po úpravách ze vztahu (10.1) bylo vyjádřeno tečné napětí:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r}{t} \quad (10.2)$$

Z předchozího vztahu vyplývá, největší vliv na tečné napětí určitého plechu bude mít tlak, jelikož každý plech má konstantní jak tloušťku, tak i poloměr. Z tohoto důvodu byla do předchozího vzorce pro výpočet tečného napětí použita vždy výška sloupce kapaliny až ke spodní hraně daného plechu, neboli lokální  $p_{max}$ .

Výpočet pomocí EUROKODŮ pro zjištění obvodového napětí je založen na stejném principu a po jistých úpravách bychom dostali de-fakto stejnou vztah. Ovšem jak je možno vyvodit z předchozího obrázku (Obrázek 10.3), maximální obvodové napětí nemusí být vždy na spodní hraně plechu, jak je možné také vidět na následujícím obrázku.



**Obrázek 10.4** Obvodové napětí na plotně

Stejně jako v předchozí kapitole (10.1.1) byly vybrány jednotlivé plotny a dále byly zapsány maximální hodnoty obvodového napětí a vypsány do následující tabulky.

Tabulka 10.2 taktéž obsahuje informace o již zmíněném obvodovém napětí vypočteného pomocí předchozího vzorce a také rozdíl těchto hodnot. Nejdůležitějšími hodnotami jsou zde ovšem procentuální hodnoty rezervy a využitelnosti materiálu vzhledem k dovolenému napětí dle 6.3.

**Tabulka 10.2 Obvodová napětí a využitelnost materiálu**

Lub	Tloušťky	Obvod. napětí (MKP) [MPa]	Obvod. Napětí (10.2) [MPa]	Rozdíl	Dovolené napětí [MPa]	Rezerva <sup>9</sup>	Využitelnost <sup>10</sup>
[-]	[mm]						
1	3	54	65	9%	245	78%	22%
2	3	123	126	1%	245	50%	50%
3	3	172	188	4%	245	30%	70%
4	3	225	245	5%	245	8%	92%
5	4	218	236	4%	245	11%	89%
6	5	217	225	2%	245	11%	89%
7	6,3	207	208	0%	245	16%	84%
8	6,3	237	237	0%	245	3%	97%
9	8	228	210	-4%	270	16%	84%

Z předchozí tabulky je zřejmé, že na využitelnost materiálu má větší vliv obvodové napětí. Hodnoty využitelnosti materiálu z tabulky 10.2 se pohybují od **22%** do **97%**. Stejně jako u redukovaného napětí, menší využitelnost materiálu u prvních tří řad je dána minimální používanou tloušťkou. Střední hodnota se pohybuje kolem **85%**, což odpovídá současným zásadám pro návrh dle norem. Minimální rezerva je **3%**. Tato hodnota je stále v toleranci a může být zdůvodněna tím, že další používaná tloušťka plechů je 8mm, což by znamenalo nárůst tloušťky celé řady o 1,7mm.

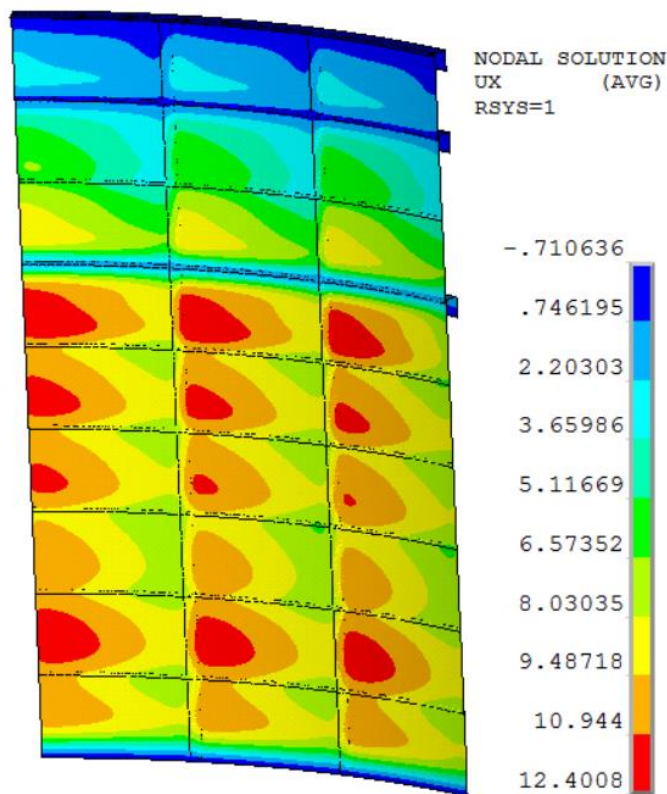
Taktéž je zde shoda tečného napětí vypočteného pomocí MKP a Laplaceovým vztahem.

<sup>9</sup> Jedná se o rezervu vůči dovolenému obvodovému napětí

<sup>10</sup> Jedná se o využitelnost materiálu vůči dovolenému obvodovému napětí.

### 10.1.3 Radiální posuv

Dále byl analyzován posuv, který vyvolalo provozní zatížení. Na následujícím obrázku jsou vykresleny radiální posuvy vzniklé od zatížení médiem a vlastní tíhy nádrže.



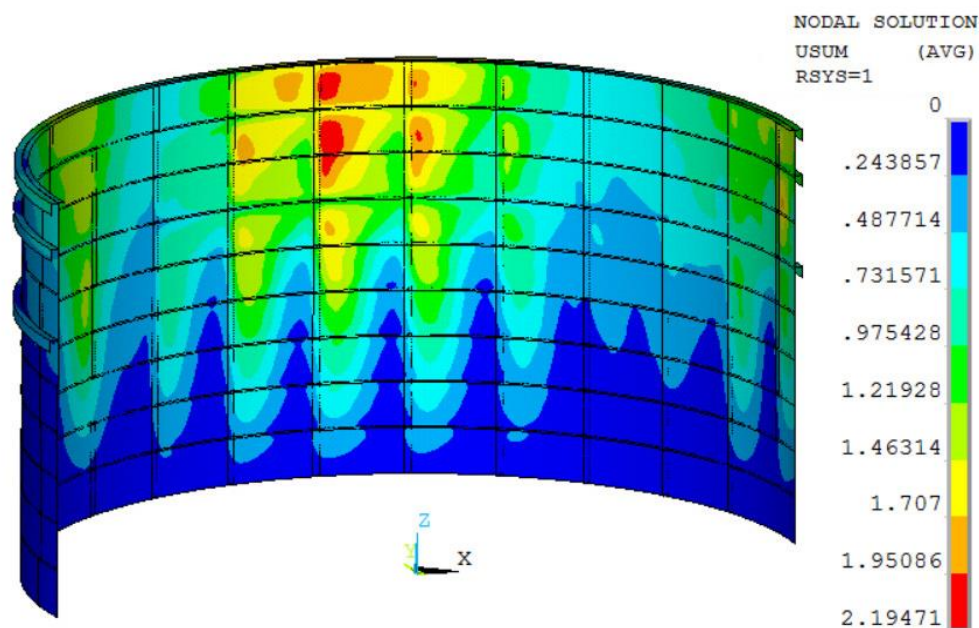
Obrázek 10.5 Radiální posuvy současné varianty

Z předešlého obrázku je zřejmé, že maximální radiální posuv, vypočtený pomocí MKP na analyzované nádrži je 12,4mm. Tento posuv je zcela zanedbatelný vzhledem k rozměrům nádoby jako celku. Taktéž je možno vyčíst, že posuvy jsou kladné, tj. nádrž se dle očekávání „boulí“ směrem ven z nádrže. Také je nutno si všimnout plechů v třetí řadě od spodu, které vykazují nižší radiální posuvy než-li okolní řady. Tento fakt je také možno vyvodit z tabulky 10.1 a tabulky 10.2, kde vycházela využitelnost materiálu nižší, než okolní řady. To je způsobeno tím, že 5mm plech je zde již nevyhovující a další možná (skladová) tloušťka je 6,3mm, což znamená nárůst 1,3mm. Nejmenší hodnoty radiálních posuvů dle předpokladů vychází v horních řadách, obzvláště pak v oblasti výztuh.



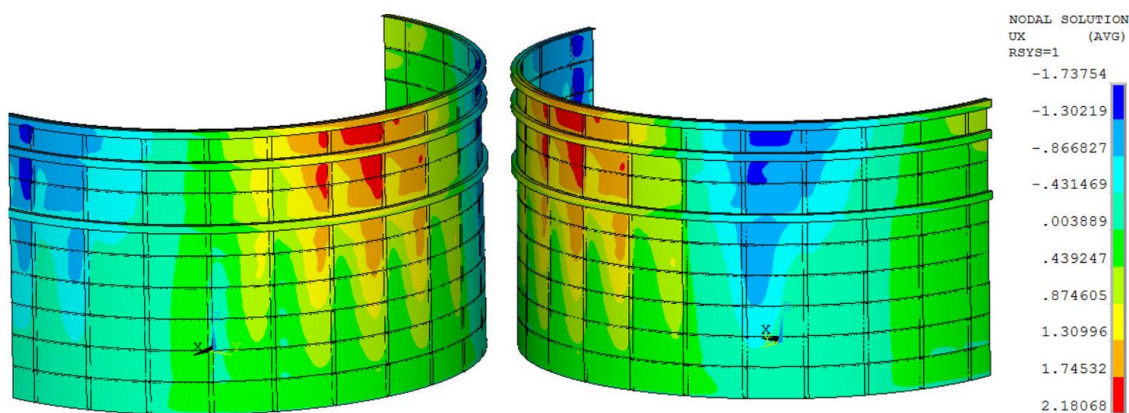
#### 10.1.4 Kontrola nádrže vzhledem k MS deformační stability

Dále je nutno zkontrolovat nádrž, zda vyhoví při zatížení větrem na MS deformační stability. Toto zatížení má největší vliv na ztrátu stability celé konstrukce. Výsledek analýzy ze zatížení větrem, je možno vidět na následujícím obrázku. Obrázek 10.7 zobrazuje posuvy jednotlivých prvků nádrže.



Obrázek 10.6 Celkové posuvy od zatížení větrem

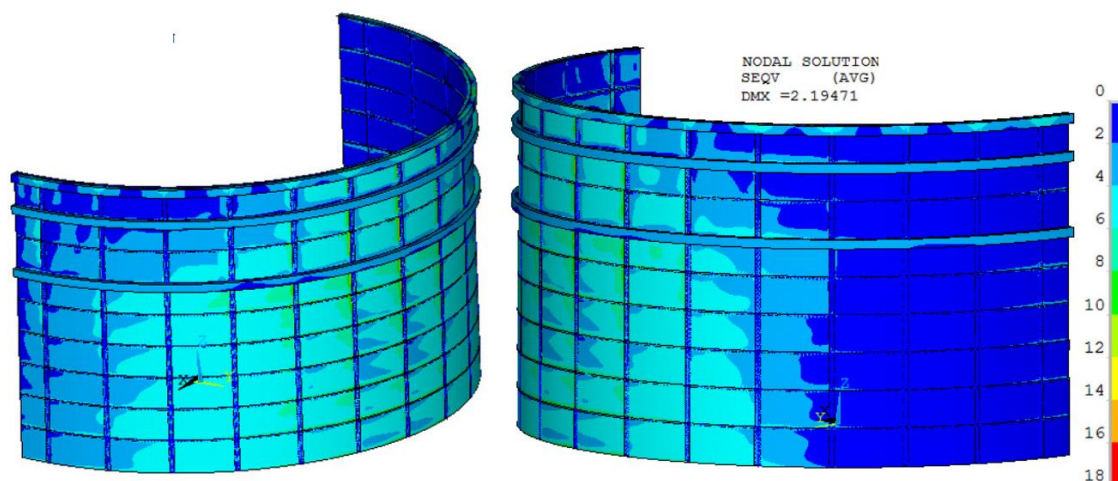
Z přechozího obrázku je zřejmé, že největší posuv je lokalizován v místě, kde byla absolutní hodnota tlaku od větru největší. Toto místo je na tomto modelu zhruba v okolí 90°. Avšak výsledky z vektorového vykreslení posuvů nedává příliš mnoho informací o chování a směru boulení nádrže. Z tohoto důvodu byly na následujícím obrázku vykresleny hodnoty radiálních posuvů.



Obrázek 10.7 Radiálních posuvy

Z předchozího obrázku je patrné, že na nádrži převládá kladná hodnota radiálních posuvů, což znamená, že na chování současné varianty nádrže má větší vliv přetlak než podtlak (síla

větru působící na čelo nádrže). Maximální hodnota radiálních posuvů je 2,18mm. Tato hodnota není nijak velká oproti celkovým hodnotám nádrže. Dále bylo také vykresleno redukované napětí, což je možné vidět na následujících obrázcích.



**Obrázek 10.8 Redukované napětí podle podmínky HMM**

Dle výsledků z předchozích obrázků lze předpokládat, že současná nádrž odolá zatížení větrem. Z výsledků je dále patrné, že zatížení větrem nemá ani tak hlavní vliv na mezní stav pružnosti, jako na již zmíněnou ztrátu deformační stability.

## 10.2 Modifikovaná verze nádrže

Návrh optimálních tloušťek plechů bylo velmi náročné, jelikož každý plech musel mít hodnotu menší, než jsou dovolené hodnoty pro redukované a tečné napětí a zároveň vyhovět také na zatížení větrem. Navíc musely být zároveň zvoleny takové tloušťky, aby byla využitelnost materiálu co největší. Výsledné zvolené tloušťky použité v modifikaci byly zapsány do následující tabulky.

**Tabulka 10.3 Porovnání tloušťek současné a alternativní varianty**

Lub	Současná verze	Alternativní verze
	Tloušťka [mm]	Tloušťka [mm]
1	3	2
2	3	2
3	3	2
4	3	2,5
5	4	3
6	5	3,5
7	6,3	4
8	6,3	5
9	8	6

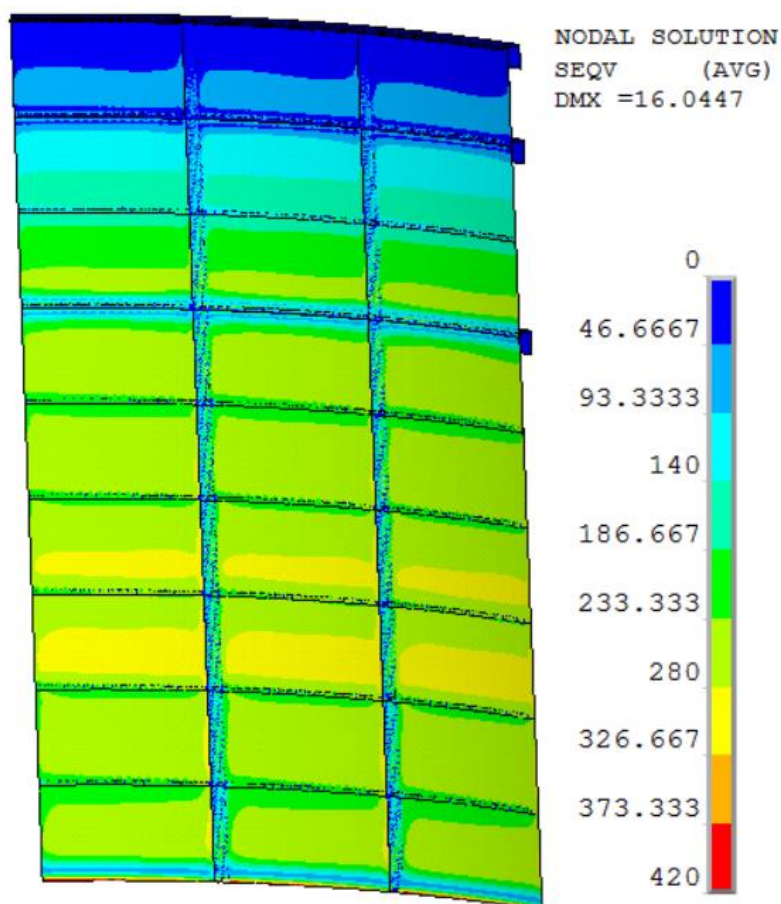
Z předchozí tabulky je evidentní, že opravdu došlo k výraznému snížení tloušťek. Hlavní změnou je zde skutečnost, že pro výpočet byla volena nejmenší tloušťka **2mm**. Při zvolení malých tloušťek, může vzniknout nezanedbatelné boulení nádrže v horních řadách, což může způsobit ztrátu stability celé nádrže. Boulení nádrže je ovšem nejčastěji způsobeno velkým axiálním zatížením. Toto zatížení je způsobeno převážně váhou střechy. Jelikož tato nádrž je otevřená, a tudíž nemá žádnou střechu, je možné si dovolit i tloušťky menší než praxí vyzkoušené 3mm.

Maximální tloušťka klesla z **8 mm na 6mm**. Taktéž největší rozdíl tloušťek po řadách klesl z 1,7mm na 1mm, což může vést k lepší těsnosti nádrže. Další rozdíly a celkové technicko-ekonomické zhodnocení je uvedeno v kapitole 11.

Stejně jako u kontroly současné varianty, byly u alternativní varianty analyzovanými veličinami redukované HMM napětí, obvodové napětí a následná kontrola vůči MS deformační stability. Dále pro doplnění, byl vykreslen také radiální posuv nádrže a redukované napětí ve šroubech. U kontroly ze zatížení větrem alternativní varianty byla provedena také modální analýza.

### 10.2.1 Ekvivalentní napětí podle podmínky HMH

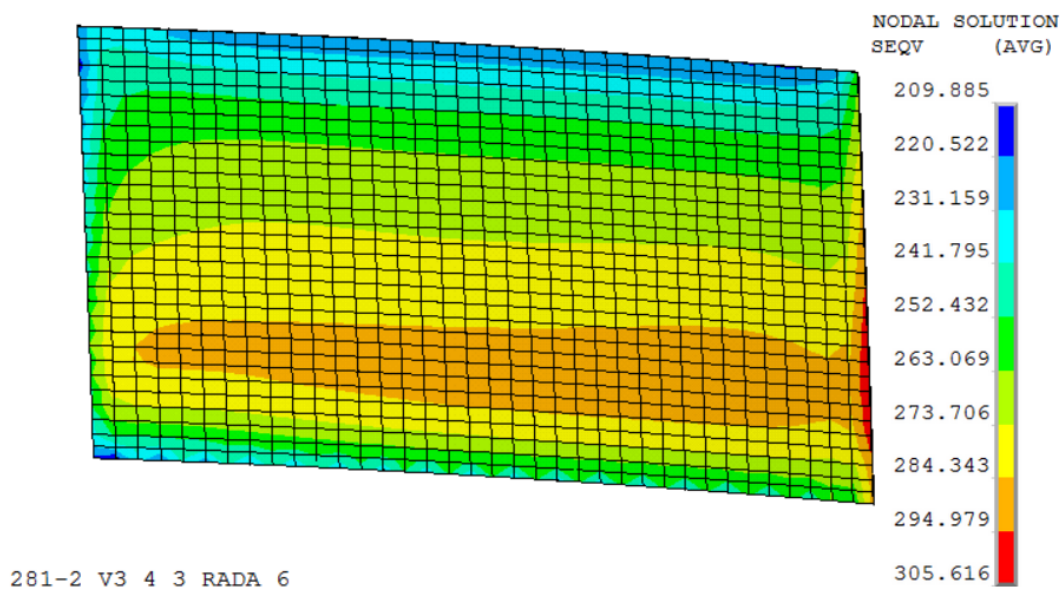
Podobně jako u analýzy současné varianty bylo jako první zkoumáno redukované napětí podle podmínky HMH. Pro prezentaci této veličiny byl zvolen stejný postup. Byly vybrány 3 řady plechů, na kterých bylo vykresleno zmíněné redukované napětí. Stejně jako v minulém případě byla upravena barevná stupnice na hodnoty **0-420MPa**, což je návrhové/dovolené redukované napětí pro navrhovaný materiál.



Obrázek 10.9 Redukované napětí pro navrhovanou verzi

Z předchozího obrázku je patrné, že největší hodnoty redukovaného napětí se nachází v šesté a sedmé řadě od shora. Taktéž z tohoto obrázku lze vyvodit to, že maximální hodnota radiálního posuvu je 16mm, což je zhruba jenom o 3,5mm více než u současné varianty. Na následujícím obrázku je opět vykresleno redukované napětí na již zmíněné ořezané oblasti nazvaná „plotna“.





Obrázek 10.10 Redukované napětí na plotně

Z předchozího obrázku lze vyvodit, že redukované napětí na plechu v šesté řadě se pohybuje mezi hodnotami **209MPa** a **305MPa**. Maximální napětí je lokalizováno ve spodní polovině plotny, avšak nenachází se na spodním rohu.

Stejně jako v předchozím případě byly následně vybrány jednotlivé plotny plechů po řadách a do následující tabulky byly vypsány maximální hodnoty redukovaného napětí podle podmínky HMM. Následně byla opět pro tyto hodnoty přepočtena využitelnost materiálu.

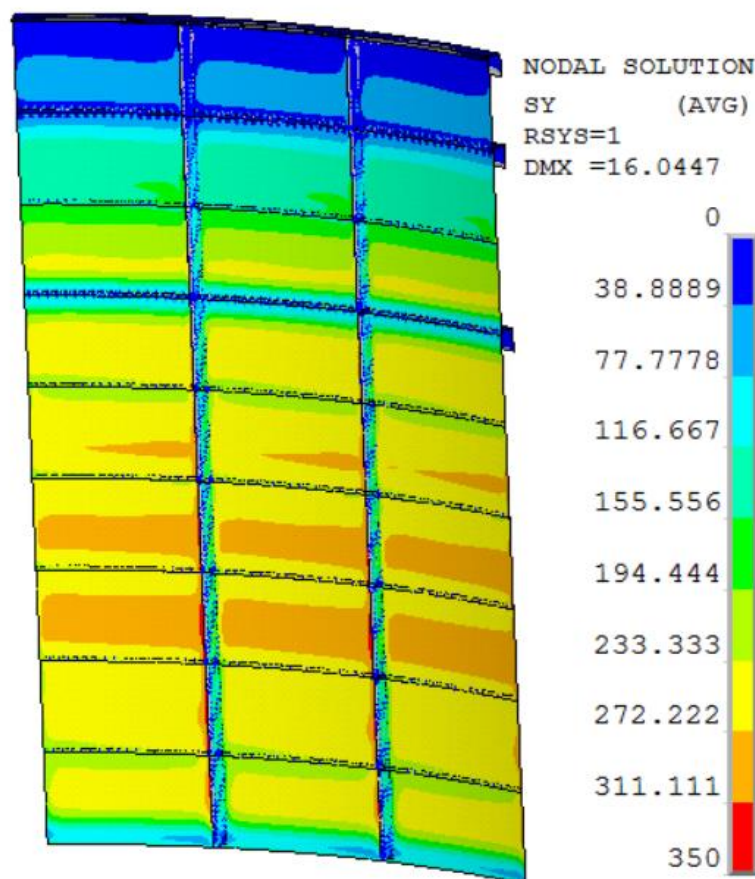
Tabulka 10.4 Využitelnost materiálu vzhledem k meznímu stavu pružnosti (návrh)

Alternativní varianta				
Lub [-]	Tloušťka [mm]	Redukované napětí [MPa]	Rezerva	Využitelnost
1	2	78	81%	19%
2	2	178	58%	42%
3	2	253	40%	60%
4	2,5	270	36%	64%
5	3	289	31%	69%
6	3,5	305	27%	73%
7	4	319	24%	76%
8	5	306	27%	73%
9	6	305	27%	73%

Z předchozí tabulky je zřejmé, že využitelnost materiálu se pohybuje v rozmezí 19%-76%, což jsou podobné hodnoty jako u současné varianty. Avšak pomineme-li první dvě řady, hodnoty využitelnosti se pohybují od 60%-76%. Z předchozí tabulky tedy nejsou zřejmé velké změny využitelnosti materiálu, avšak jak již bylo zmíněno v přechodících kapitolách, největší vliv na využitelnost materiálu má obvodové napětí, které je analyzováno v následující kapitole.

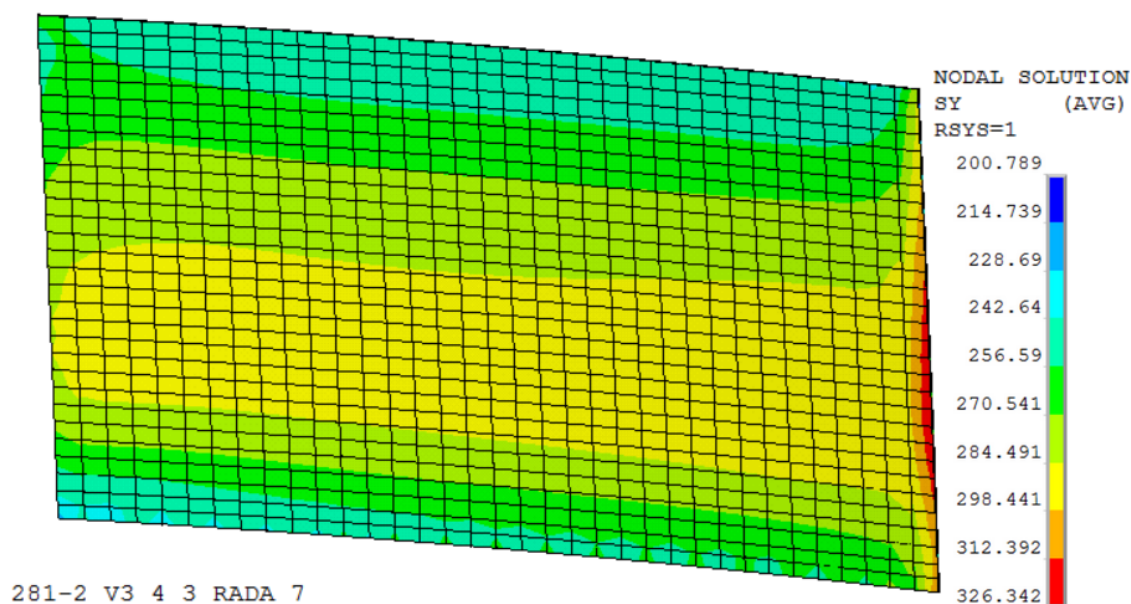
### 10.2.2 Obvodové napětí

Další analyzovanou veličinou modifikované varianty bylo obvodové napětí. Na následujícím obrázku je vykresleno obvodové napětí, opět pro přehlednost pouze 3 řad.



**Obrázek 10.11 Obvodové napětí alternativní varianty.**

Z předchozího obrázku je evidentní, že maximální obvodové napětí se nachází na 3,4 a 5 řadu od spodu. Taktéž z předchozího obrázku je patrné, že hodnoty obvodového napětí se nacházejí nejčastěji hodnotami 233MPa a 272MPa. Na následujícím obrázku je opět vykresleno obvodové napětí na plotně.



Obrázek 10.12 Obvodové napětí na plotně

Na předchozím obrázku je vykresleno napětí na plotně sedmé řady. Maximální hodnota napětí na této plotně je **326MPa** a toto napětí se nachází zhruba uprostřed plotny. Takto byly opět vybrány postupně plotny všech lubů a hodnoty maximálního obvodového napětí byly zapsány do následující tabulky.

Tabulka 10.5 Využitelnost materiálu z hlediska dovoleného obvodového napětí

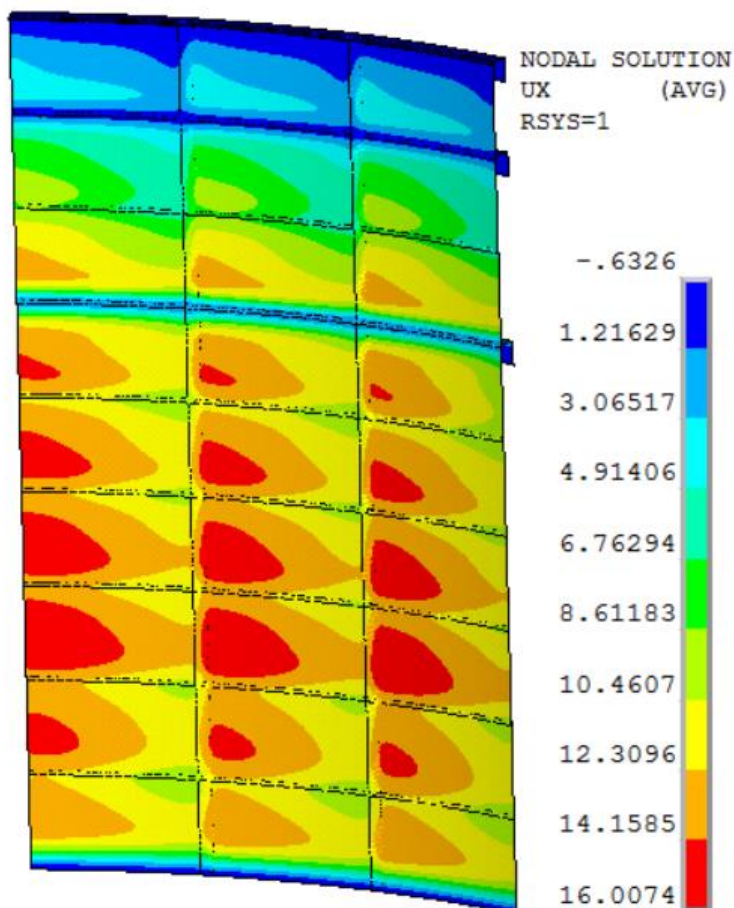
Lub	TLoušťky	Obvod. napětí MKP	Obvod. napětí (10.2)	Rozdíl	Dovolené napětí	Rezerva	Využitelnost
[-]	[mm]	[MPa]	[MPa]		[MPa]		
1	2	77	97,7	11%	353	78%	22%
2	2	189	189,9	0%	353	46%	54%
3	2	256	282,1	5%	353	27%	73%
4	2,5	278	299,5	4%	353	21%	79%
5	3	297	314,7	3%	353	16%	84%
6	3,5	312	322,4	2%	353	12%	88%
7	4	326	328,2	0%	353	8%	92%
8	5	313	299,5	-2%	353	11%	89%
9	6	306	280,3	-5%	353	13%	87%

Z předchozí tabulky je patrné, že bylo opět dosaženo velké shody obvodového napětí vypočteného pomocí (10.2) a MKP. Taktéž je z této tabulky patrné, že maximální obvodové napětí se nachází na sedmém lubu. Tomuto napětí odpovídá využitelnost materiálu 92%, což je dle mého názoru optimální hodnota. Celková využitelnost materiálu se pohybuje od 22% do již zmíněných 92%, přičemž nejčastěji se hodnoty rezervy pohybují mezi 10% až 20%.



### 10.2.3 Radiální posuv

Další analyzovanou veličinou byl radiální posuv. Na následujícím obrázku je vykreslena hodnota radiálních posuvů pro 3 řady plechů.

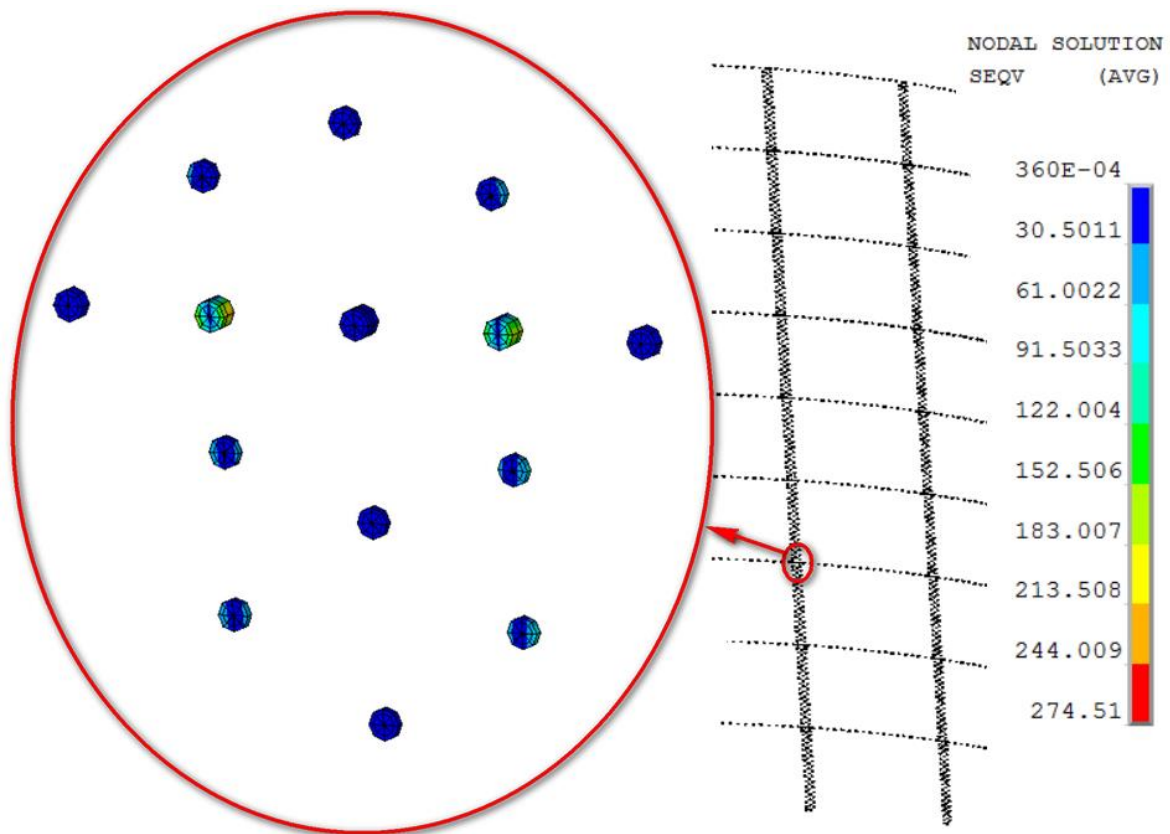


Obrázek 10.13 Radiální posuvy navrhované varianty

Z předchozího obrázku je zřejmé, že maximální hodnota radiálních posuvů je **16mm**, což je o 4mm více, než-li u současné varianty. Tato maximální hodnota posuvů se nachází na 3lubu od spodu. Z průběhu radiálních posuvů vyplývá, že tyto posuvy přibývají postupně po lubech až do sedmého lubu od vrchu, kde dále dochází ke snížení této hodnoty. Opět nejmenší hodnoty radiálních posuvů jsou na horní straně nádrže, převážně pak u výztuh pláště.

#### 10.2.4 Napětí ve šroubovém spoji

Na základě rozhodnutí vytvořit model na vyšší úrovni, tj. včetně šroubů, je možné taktéž vyhodnocovat napětí ve šroubovém spoji. Na následujícím obrázku je vykresleno redukované napětí podle podmínky HMH šroubového spoje modifikované varianty.

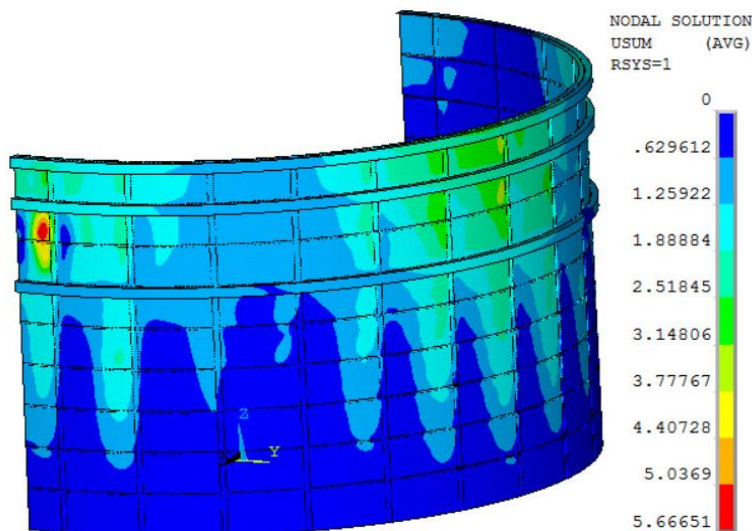


Obrázek 10.14 Redukované napětí ve šroubovém spoji

Na předchozím obrázku je možno si povšimnout, že maximální hodnota redukovaného napětí je 274MPa. Jak je možno vidět na detailu, nejvíce namáhány jsou vždy krajní řady šroubů, převážně pak ty, v oblasti zámku plechů. I když jsou mezními hodnotami mez kluzu šroubů 640MPa (šrouby 8.8), respektive 940MPa pro šrouby pevnosti 10.9, je nutno podotknout, že při návrhu se používají vždy hodnoty horšího materiálu, což je vždy materiál plechů. Také důležitou informací je skutečnost, že rozteče šroubů a jejich umístění je zvoleno na základě mnohaletých zkušeností a to nejen na základě pevnostních analýz, ale také těsností (netěsností) spoje. Také z tohoto důvodu byla prováděna pouze modifikace plášťových plechů.

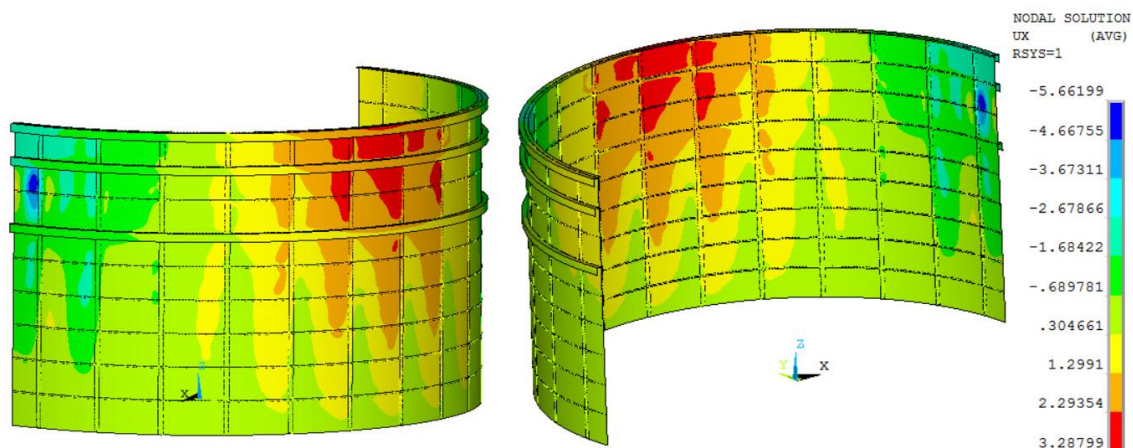
### 10.2.1 Kontrola nádrže vzhledem k MS deformační stability

Poslední analyzovaným stavem je již několikrát zmíněná kontrola modifikované nádoby na zatížení větrem. Na následujícím obrázku jsou vykresleny celkové posuvy.



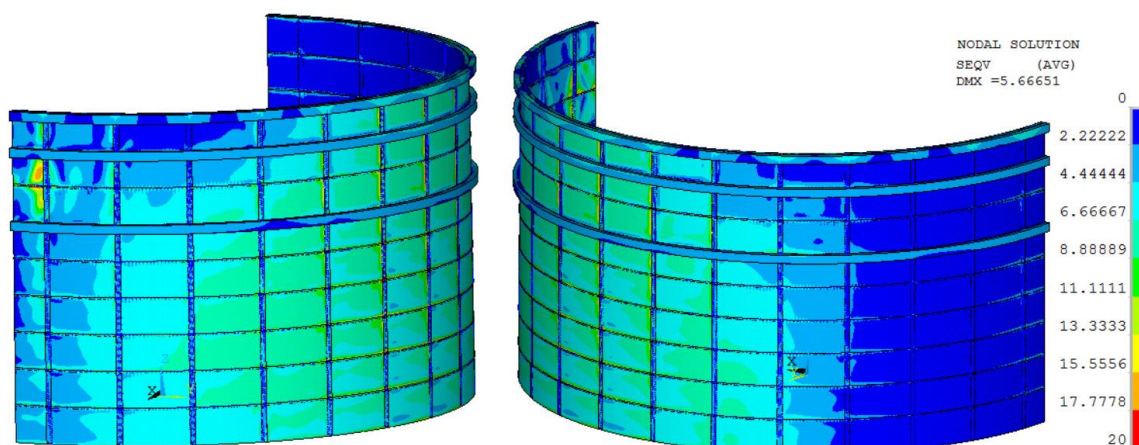
Obrázek 10.15 Celkové posuvy modifikované varianty

Na předešlém obrázku je vidět, že největší posuv je lokalizován na čele nádrže. Dále je také důležité si všimnout, že spodní část nádrže nevykazuje nikterak zvlášť velké posuvy. Na dalším obrázku jsou vykresleny radiální posuvy, které dávají další informace o boulení nádrže.



Obrázek 10.16 Radiální posuvy alternativní varianty

Ve srovnání se současnou variantou se přesunula oblast s maximálními posuvy z boku nádrže na čelo. Také velkou změnou je to, že největší hodnota radiálních posuvů je záporná, tj. že zde lokálně vzniká podtlak. Hodnoty radiálních posuvů vzrostly zhruba dvojnásobně. Tento jev vznikl v důsledku snížení tuhosti konstrukce, avšak stále se pohybují v jednotkách mm. Na dalším obrázku je vykresleno redukované napětí podle podmínky HMM.



Obrázek 10.17 Redukované napětí

Maximální redukované napětí se nachází v oblasti na čele nádrže, kde také vycházely největší záporné radiální posuvy. Stejně jako u současné varianty, na boku nádrže vzniká malé redukované napětí a na zadní straně nádrže je napětí téměř nulové.

Výsledky ze statické analýzy ukázaly, že modifikovaná varianta nádrže se jeví jako globálně stabilní, respektive se zde neprojevil žádný velký vliv nestability. Hodnoty napětí a posuvů jsou vzhledem k mezním hodnotám a rozměrům nádoby malé. Při obtékání nádrže větrem může vítr nádrž rozkmitat. Tento jev se nazývá odtrhávání Karmánových vírů a je vyjádřen Strouhalovým číslem:

$$S_h = \frac{D \cdot f}{v} \quad (10.3)$$

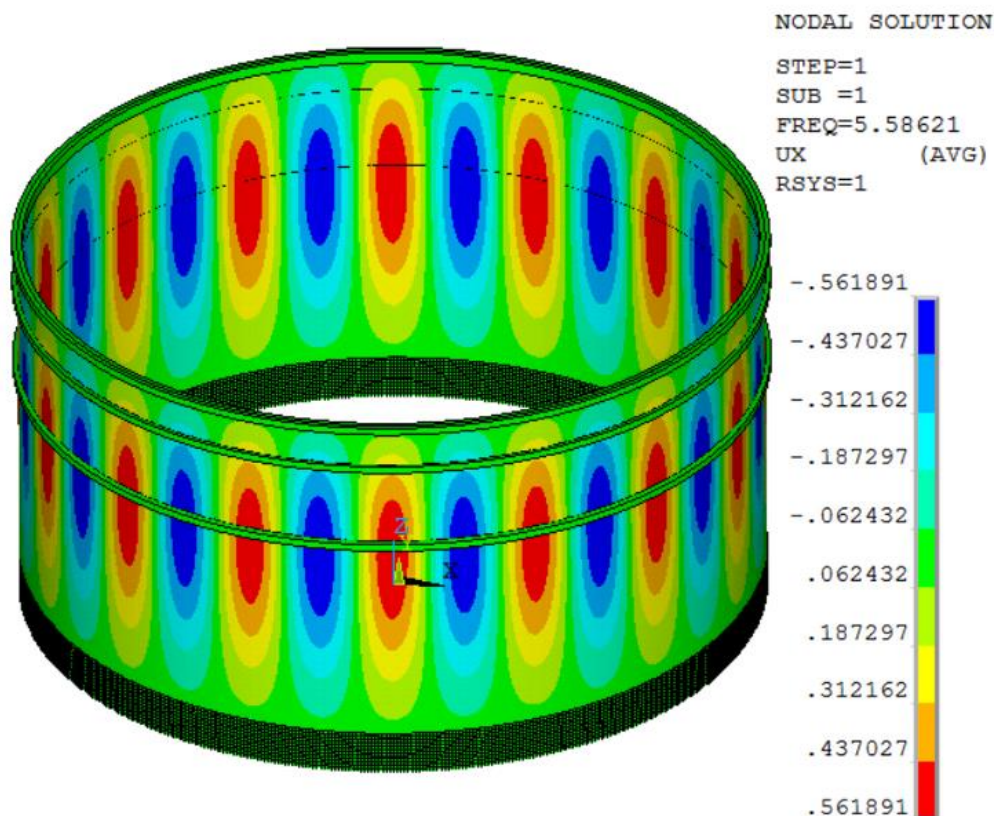
,kde  $D$  průměr nádrže [m]  
 $f$  frekvence [Hz]  
 $v$  rychlost větru [m/s].

Odtrhávání Karmánových vírů dochází při hodnotě Strouhalového čísla  $S_{hk}=0,212$ . Je tedy nutné zjistit kritickou frekvenci, při které tento jev vzniká u této alternativní verze nádoby. Tedy po úpravě vztahu (10.3) vznikne:

$$f_k = \frac{v \cdot S_{hk}}{D} = \frac{25[m \cdot s^{-1}] \cdot 0,212[-]}{20,33[m]} = 0,26 \text{ Hz} \quad (10.4)$$

Z předchozího vztahu vyšlo, že pro alternativní variantu vznikají Karmánovy víry, které mohou rozkmitat nádrž při frekvenci **0,26 Hz**. Tato hodnota je více méně sama o sobě nic neříkající. Byla tedy na zjednodušeném modelu provedena modální analýza, jejíž výsledek je možno vidět na následujícím obrázku.





**Obrázek 10.18** Výsledky z modální analýzy

Z předchozího obrázku je zřejmé, že první vlastní tvar, respektive frekvence alternativní verze nádrže je 5,58Hz. Jelikož frekvence, při které vznikají Karmánovy víry je daleko menší než nejnižší vlastní frekvence nádrže, je možné předpokládat, že tyto víry nádrž pravděpodobně nedostanou do rezonance.

Na základě všech předchozích provedených analýz lze předpokládat, že alternativní varianta vykazuje stejné, nebo podobné chování jako současná, již postavená, nádrž. Dle všech těchto předpokladů lze konstatovat, že alternativní varianta nádrže vyhověla na všechny typy zatěžování a nenastal u ní žádný z kontrolovaných mezních stavů. Pro další tvrzení o projevech této varianty je ovšem nutné výsledky ověřit experimentem.

## 11 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

### 11.1 Snížení hmotnosti objektu

Na základě výsledků z minulých kapitol byla sestavena Tabulka 11.1, která porovnává současnou variantu s alternativní variantou. Jedná se o převážně o hmotnostní porovnání, avšak jsou zde pro přehlednost vypsány i použité tloušťky.

**Tabulka 11.1 Porovnání hmotností jednotlivých variant**

Lub [-]	Současná verze		Alternativní verze	
	Tloušťka [mm]	Hmotnost plechu [kg]	Tloušťka [mm]	Hmotnost plechu [kg]
1	3	2031	2	1354
2	3	2031	2	1354
3	3	2031	2	1354
4	3	2031	2,5	1692
5	4	2708	3	2031
6	5	3385	3,5	2369
7	6,3	4265	4	2708
8	6,3	4265	5	3385
9	8	5415	6	4061
		<b>Σ28160</b>		<b>Σ20307</b>

Z předchozí tabulky vyplývá, že úspora hmotnosti alternativní varianty oproti současné variantě je **7,8tun.**

### 11.2 Přímá ekonomická úspora

Přímá ekonomická úspora se odvíjí od úspory hmotnostní. Z předchozí tabulky vyplývá, že **úspora hmotnosti** je téměř **8 tun**. Avšak je nutno zdůraznit, že při modifikaci byl použit materiál lepší jakosti, který je ovšem cenově vyšší (dražší). Důležité je, že alternativní verze má nižší hmotnost než je minimální rentabilní hmotnost nádrže (viz 5.3), která byla **27,6 tun**. Z toho vyplývá, že pokud by byl zvolen materiál **S550** na všechny plechy této nádrže bylo by dosaženo nejen redukce hmotnosti nádrže, ale také ceny. Dle dodaných cen by byla minimální přímá ekonomická úspora zhruba **4640€**.

Dále pokud bychom vzali v úvahu, že může být postaveno ročně až **30** takovýchto nádrží je z dlouhodobého hlediska tato varianta jistě zajímavá, obzvláště při skutečnosti, že se jedná o **úsporu** při téměř **nulových počátečních nákladech**.

### 11.3 Využitelnost materiálu

Úspora hmotnosti a přímá ekonomická úspora patří k důležitým parametrům, podle kterých lze rozhodnout, zda se konstrukční změny mohou vyplatit, respektive, zda mají smysl. Dalším měřítkem je také již zmíněná využitelnost materiálu. V následující tabulce byly pro porovnání zapsány využitelnosti pro obě analyzované varianty.

**Tabulka 11.2 Porovnání využitelnosti**

Lub [-]	Současná varianta		Alternativní varianta	
	Tloušťka [mm]	Využitelnost [%]	Tloušťka [mm]	Využitelnost [%]
1	3	22	2	22
2	3	50	2	54
3	3	70	2	73
4	3	92	2,5	79
5	4	89	3	84
6	5	89	3,5	88
7	6,3	84	4	92
8	6,3	97	5	89
9	8	84	6	89
Aritmetický průměr:		75		74

Z předchozí tabulky je patrné, že využitelnost materiálu celé nádrže nepatrně klesla. Ovšem na základě předchozích kapitol je evidentní, při provedení daných konstrukčních změn lze dosáhnout velké ekonomické i hmotnostní úspory při srovnatelné využitelnosti.

### 11.4 Doporučení

Dle výsledků z kapitoly 10.2 lze soudit, že po provedení zmíněných konstrukčních změn je nádrž posouzena jako globálně stabilní. Dochází zde ovšem nepatrně k lokální ztrátě stability na čele nádrže. Z tohoto důvodu by bylo vhodné zvážit jisté konstrukční změny v počtu, nebo umístění výztuh pláště.

Tato diplomová práce se zabývala pouze konstrukčními změnami plášťových plechů. Ovšem bylo by jisté vhodné se také zaměřit na šrouby spojující tyto plechy. Na této nádrži se nachází zhruba **14500 šroubů**. Cena jednoho šroubu se pohybuje okolo **10kč/kus**. Stávající šrouby mají průměr 12 mm. Vodorovné spoje jsou sice předimenzovány z důvodu zaručení těsnosti spoje, ovšem svislé spoje by mohly být dále zkoumány a analyzovány. Tyto analýzy by ovšem byly v rozsahu další diplomové práce.

Další možností větší finanční úspory je kombinace současného materiálu a materiálu použitého k modifikaci viz tabulka 11.3. Při této kombinaci materiálů by činila přímá ekonomická úspora materiálu až **4700€** na jedné nádrži. Což by znamenalo **25% finanční úsporu** na plechách oproti současné ceně.



**Tabulka 11.3 Složení pláště pro maximální ekonomickou úsporu**

Lub	Tloušťky [-]	Redukované napětí [MPa]	Obvodové napětí [MPa]	Materiál [-]	Dovolené napětí (HMH/Obvodové) [MPa]
1	2	78	77	<b>S350</b>	(320/245)
2	2	178	189	<b>S350</b>	(320/245)
3	2	253	256	<b>S550</b>	(420/353)
4	2,5	270	278	<b>S550</b>	(420/353)
5	3	289	297	<b>S550</b>	(420/353)
6	3,5	235	312	<b>S550</b>	(420/353)
7	4	305	326	<b>S550</b>	(420/353)
8	5	319	313	<b>S550</b>	(420/353)
9	6	306	306	<b>S550</b>	(420/353)

Z předchozí tabulky je zřejmé, že materiál **S350** by se dal při upravené konstrukční konfiguraci použít pouze na prvních dvou lubech od shora. Pokud by byla tato alternativa použita, bylo by nutno zamezit záměně těchto dvou materiálů na stavbě. Pokud by totiž došlo k záměně, mohlo by dojít po uvedení do provozu k neúmyslnému dosažení některého z mezních stavů.

## 12 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provedení modifikace tloušťky obvodových plechů montované ocelové nádrže. Tohoto mělo být dosaženo po provedení rešeršní studie související s touto problematikou a po vytvoření výpočtového modelu s následnou analýzou dosažených výsledků. Všechny požadované cíle byly splněny.

Tato práce také obsahuje, pro lepší pochopení problematiky, popis jednotlivých dílů včetně popisu výroby a montáže. Návrh těchto nádrží se nejčastěji provádí pomocí norem. Vzhledem k faktu, že problematika montovaných ocelových nádrží je stará zhruba 100 let, je nutné podotknout, že první nádrže byly navrhнутy velmi dobře, jelikož se princip nijak příliš nezměnil. Ovšem z důvodu konkurence je každá firma nucena vymýšlet nové postupy a „vychytávky“ právě proto, aby jejich nádrž byla pro zákazníka ta nejlepší. Zde spousta firem zabývajících se touto problematikou, naráží na „omezení“ norem. Tento postup výpočtu je totiž velmi zastaralý a „zkostnatělý“, avšak vyzkoušený a garantovaný. Konstrukteři se vždy snaží být na takzvané bezpečné straně, právě z důvodu toho, že právě oni jsou zodpovědní za technické parametry nádrže. Pokud by ovšem byly normy inovovány, je zde velká pravděpodobnost, že by se dospělo k závěru, že dané konstrukce mohou mít i jiné parametry, než stávající, limitované současnými normami a standardy. Plně totiž souhlasím s tvrzením, že veškeré objekty by měly být navrhovány a analyzovány vzhledem k současným možnostem vědy a techniky.

Podnětem k zadání této práce byla otázka, zda by nebylo rentabilní upravit jisté parametry nádrže tak, aby došlo (také) k redukci hmotnosti. Po důkladném prostudování konstrukce bylo dosaženo názoru, že největší vliv na možnou modifikaci budou mít obvodové plechy. Tudíž zmíněnými parametry jsou myšleny tloušťky obvodových plechů a jejich materiál. Ovšem aby byly výsledky použitelné, bylo nutno využít stávající zásady navrhování, neboli v jistých případech se „opřít“ o normy. Nejdříve totiž bylo nutné provést analýzu současné nádrže, právě proto, aby bylo možno provést tvrzení, že srovnání MKP a eurokódů je možné. Ukázalo se, že toto srovnání je nejen možné, ale vzhledem k vysoké úrovni modelu a zachování stávajících pravidel vykazuje také vysokou shodu. Na základě těchto výsledků byla prováděna modifikace. Hlavní podstatou modifikace bylo nahrazení současného materiálu (S350) za materiál o vyšší pevnosti (S550), za současného snižování tloušťky jednotlivých plechů tak, aby na nádrži nedošlo k dosažení vymezených mezních stavů. Tedy po několika provedených analýzách bylo známo složení pláště alternativní varianty. Zde je podstatné podotknout, že při výpočtovém modelování dochází ke zjednodušení reality a je nutné ověřit experimentem, zda jsou výsledky použitelné. Dále je při tomto experimentu nutné použít stejné zásady a předpoklady, které jsou vypsány v předešlých kapitolách. Teprve až po provedení všech potřebných experimentů a ověření lze jistě konstatovat, zda navrhovaná varianta může být bez výhrad použita v praxi.

Pokud bychom ovšem vycházeli z předpokladu, že výsledky z výpočtového modelování jsou správné, a tedy i shodné s realitou, došlo u alternativní varianty k velkému poklesu hmotnosti a tomu odpovídající ekonomické úspoře. Přesněji se jedná o redukci hmotnosti ze současných 28,1 tun na 20,3 tun, což odpovídá úspoře zhruba 7,8 tun. Tato hmotnostní úspora (u jedné nádrže) odpovídá přímé ekonomické úspoře až 124000 Kč, což je přibližně 25% oproti stávajícím nákladům za plášťové plechy. To je, dle mého názoru, velká jak ekonomická, tak i hmotnostní úspora obzvláště při faktu, že se jedná o úspory při nulových počátečních nákladech. Veškeré tyto úspory se týkaly pouze jedné konkrétní nádrže, ovšem

takových nádrží se staví několik za rok. I když se jedná o zajímavou úsporu, po důkladném prostudování tohoto problému a provedení potřebných experimentů a ověření, by mohla být tato úspora ještě daleko větší. Je totiž možno zvážit podstatnost všech součinitelů a zvolených bezpečností, případně se dále zaměřit na modifikaci týkající se například šroubů této nádrže.

Výsledky této práce umožňují posunout problematiku montovaných ocelových nádrží kousek dále, popřípadě dávají minimálně podnět na inovaci současného způsobu navrhování. Pokud by bylo více takových prací, je možné prostudovat problematiku opravdu dopodrobna a v budoucnu se obejít bez nutnosti používání složitých vzorců.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KONEČNÝ, Jiří. *Montované ocelové nádrže*. 2014 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Bakalářská práce, Brno. Ing. Petr Marcián Ph.D.
- [2] Kohimex s. r. o. [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.kohimex.cz/> >.
- [3] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí: učební texty*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.
- [4] JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí: hledání souvislostí : učební texty*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.
- [5] Online ČSN normy [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <https://csnonline.unmz.cz/> >.
- [6] FM approved [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.fmglobal.com/> >.
- [7] Vertrauen durch Sicherheit [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.zkratky.cz/VdS/13262> >.
- [8] American Water Works Association [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.awwa.org/about-us.aspx> >.
- [9] Systém managementu kvality [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.eurocert.cz/certifikace/cz/> >.
- [10] Pojem optimalizace [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/optimalizace-optimalisace> >.
- [11] Arcelor Mittal [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://corporate.arcelormittal.com/> >.
- [12] Mezní stavy [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: <[http://www.student.chytrak.cz/unava/02ms\\_pruz.pdf](http://www.student.chytrak.cz/unava/02ms_pruz.pdf)>
- [13] VLK, Miloš. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [14] ABAQUS [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> >.
- [15] ANSYS [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.ansys.com> >.

- [16] RFEM [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <https://www.dlubal.com/cs> >.
- [17] INENTOR [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.autodesk.com/products/autodesk-inventor-family/overview> >.
- [18] AUTOCAD [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.autodesk.com/products/autodesk-autocad/overview> >.
- [19] Janíček, P., Ondráček, E., Vrbka, J. (1992): Mechanika těles - Pružnost a pevnost I, Brno
- [20] Janíček, P., Vrbka, J., Ondráček, E., Burša, J. (2006): Mechanika těles. Pružnost a pevnost II, CERM
- [21] Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: < <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/> >.
- [22] Přednáška předmětu RTK, *Tenkostěnné konstrukce*. prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [23] Modely turbulence [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: <[http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf)>.
- [24] Mapa větrných oblastí [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/okna-dvere/7505-dopad-zavedeni-eurokodu-na-okenni-konstrukce>>.
- [25] Rozdělení tlaku pro kruhové válce [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupný z WWW: <<https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.4.2.2007.svg.html>>.
- [26] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČNI, 2013.
- [27] ČSN EN 1991-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 4: Zatížení zásobníků a nádrží, ČNI, 2013.
- [28] ČSN EN 1993-4-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-1: Zásobníky ČNI, 2013.
- [29] ANSYS 15.0 product help

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

### Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Sila na kukuřici na Ukrajině [2] .....	14
Obrázek 1.2 Sprinklerová nádrž dle FM Global pro Amazon v Praze[2] .....	14
Obrázek 1.3 Nádrže pro ČOV v Polsku [2] .....	15
Obrázek 1.4 Sila na senáž ve Švýcarsku[2] .....	15
Obrázek 2.1: Podmnožiny systému podstatných veličin .....	17
Obrázek 3.1 Foto modifikovaného typu nádrže.....	21
Obrázek 3.2 Hlavní konstrukční díly nádrže .....	22
Obrázek 3.3 Detail šroubového spoje .....	23
Obrázek 3.4 Detail kotvení nádrže (Startovací segment) .....	24
Obrázek 3.5 Osazený startovací segment připravený k zalití betonem .....	25
Obrázek 3.6 Revizní otvor (včetně víka) .....	25
Obrázek 3.7 Zkompletovaná a namontovaná větrná výztuha.....	26
Obrázek 4.1 Ukázka výrobního výkresu.....	27
Obrázek 8.1 Model geometrie nádrže .....	44
Obrázek 8.2 Model geometrie plechu .....	45
Obrázek 8.3 Model vazeb .....	46
Obrázek 8.4 Model vazeb a zatížení .....	47
Obrázek 8.5 Zatížení nádoby hydrostatickým tlakem .....	48
Obrázek 9.1 Závislost dynamického tlaku na výšce [26] .....	51
Obrázek 9.2 Model geometrie .....	52
Obrázek 9.3 Model vazeb a zatížení .....	53
Obrázek 9.4 Detail mapované sítě v oblasti nádoby.....	54
Obrázek 9.5 Rozdělení tlaku pro válce s kruhovým průřezem [25] .....	55
Obrázek 9.6 Rozložení tlaku v okolí nádrže.....	55
Obrázek 10.1 Redukované napětí od zatížení mediem.....	57
Obrázek 10.2 Redukované napětí na plotně 6. lubu .....	58
Obrázek 10.3 Obvodové napětí .....	59
Obrázek 10.4 Obvodové napětí na plotně.....	60
Obrázek 10.5 Radiální posuvy současné varianty .....	62
Obrázek 10.6 Celkové posuvy od zatížení větrem .....	63
Obrázek 10.7 Radiálních posuvy .....	63
Obrázek 10.8 Redukované napětí podle podmínky HMM.....	64
Obrázek 10.9 Redukované napětí pro navrhovanou verzi .....	66
Obrázek 10.10 Redukované napětí na plotně .....	67
Obrázek 10.11 Obvodové napětí alternativní varianty. ....	68
Obrázek 10.12 Obvodové napětí na plotně.....	69
Obrázek 10.13 Radiální posuvy navrhované varianty .....	70
Obrázek 10.14 Redukované napětí ve šroubovém spoji.....	71
Obrázek 10.15 Celkové posuvy modifikované varianty.....	72
Obrázek 10.16 Radiální posuvy alternativní varianty .....	72
Obrázek 10.17 Redukované napětí .....	73
Obrázek 10.18 Výsledky z modální analýzy .....	74
Obrázek 0.1 Mapa větrných oblastí na území ČR dle ČSN EN 1991-1-4 [24].....	91

*Autor obrázků a fotek bez uvedeného zdroje: vlastní (Jiří Konečný, nádrže firmy Kohimex)*

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Přibližné hmotnosti prvků nádrže a mez kluzu použitého materiálu .....	26
Tabulka 5.1 Základní parametry nádrže .....	33
Tabulka 5.2: Použité tloušťky obvodových plechů a jejich výška .....	33
Tabulka 5.3: Materiály použité při modifikaci .....	34
Tabulka 5.4 Značení daných ocelí [10] .....	34
Tabulka 5.5 Přehled mechanických vlastností daných materiálů [10] .....	35
Tabulka 5.6 Porovnání rentabilních hmotností nádrže .....	35
Tabulka 6.1 Tabulka s mezními hodnotami obvodového napětí [2] .....	39
Tabulka 8.1: Tlak odpovídající výšce sloupce kapaliny .....	48
Tabulka 8.2 Číselné označení průřezů a jejich tloušťky .....	49
Tabulka 8.3 Napětí pro různé prvky .....	50
Tabulka 10.1 Redukované napětí a využitelnost materiálu .....	58
Tabulka 10.2 Obvodová napětí a využitelnost materiálu .....	61
Tabulka 10.3 Porovnání tlouštěk současné a alternativní varianty .....	65
Tabulka 10.4 Využitelnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti (návrh) .....	67
Tabulka 10.5 Využitelnost materiálu z hlediska dovoleného obvodového napětí .....	69
Tabulka 11.1 Porovnání hmotností jednotlivých variant .....	75
Tabulka 11.2 Porovnání využitelnosti .....	76
Tabulka 11.3 Složení pláště pro maximální ekonomickou úsporu .....	77



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Veličina
B	[m]	Šířka plechu
D	[m]	Průměr nádoby
E	[MPa]	Youngův modul
$f_y$	[MPa]	Mez kluzu materiálu
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Tíhové zrychlení
h	[m]	Výška vodní sloupce
H	[m]	Výška plechu
$J_y$	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment
$M_o$	[Nmm]	Ohybový moment
p	[MPa]	Hydrostatický tlak
$p_k$	[MPa]	Tlak kapaliny
$p_{max}$	[MPa]	Maximální tlak
r	[m]	Poloměr nádrže
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
$r_m$	[m]	Meridiánový poloměr
Rm	[MPa]	Mez pevnosti materiálu
Sh	[-]	Strouhalovo číslo
$Sh_k$	[-]	Kritické strouhalovo číslo
t	[m]	Tloušťka plechů
v	[m/s]	Rychlost větru
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	Modul průřezu v ohybu
$\gamma_{fh}$	[-]	Součinitel stálého zatížení- Zatížení od hydrostatického tlaku
$\gamma_{fw}$	[-]	Proměnné nepříznivé zatížení- Zatížení od větru

---

$\gamma_{m0}$	[-]	Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu – únosnost průřezů
$\gamma_{m2}$	[-]	Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu – únosnost průřezů při porušení
$\gamma_{m2b}$	[-]	Dílčí součinitel spolehlivosti – únosnost šroubů a plechů v otláčení
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita vzduchu
$\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota kejdy
$\rho_{ocel}$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota oceli
$\rho_{vzduch}$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota vzduchu
$\sigma_{td}$	[MPa]	Dovolené tečné napětí
$\sigma_{nd}$	[MPa]	Dovolené návrhové napětí
$\sigma_m$	[MPa]	Meridiánová složka napětí
$\sigma_t$	[MPa]	Tečná složka napětí

Zkratka	Význam
AWWA	American water works asociation
CFD	Computational Fluid Dynamics
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
FM	Factory mutual
HMH	Huber, von Mises, Hencky
HÚ	Horní úhelník
ISO	International Organization for Standardization
KKL	Firemní označení všech nádrží
KP	Keypoint (bod)
L	Line (Čára)
LUB	Technické označení pro vodorovnou řadu plechů
MKP	Metoda konečných prvků
MS	Mezní stav
RTK	Tenkostěnné konstrukce
SST	Shear stress transport
ÚMTMB	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
VV	Větrná výztuha

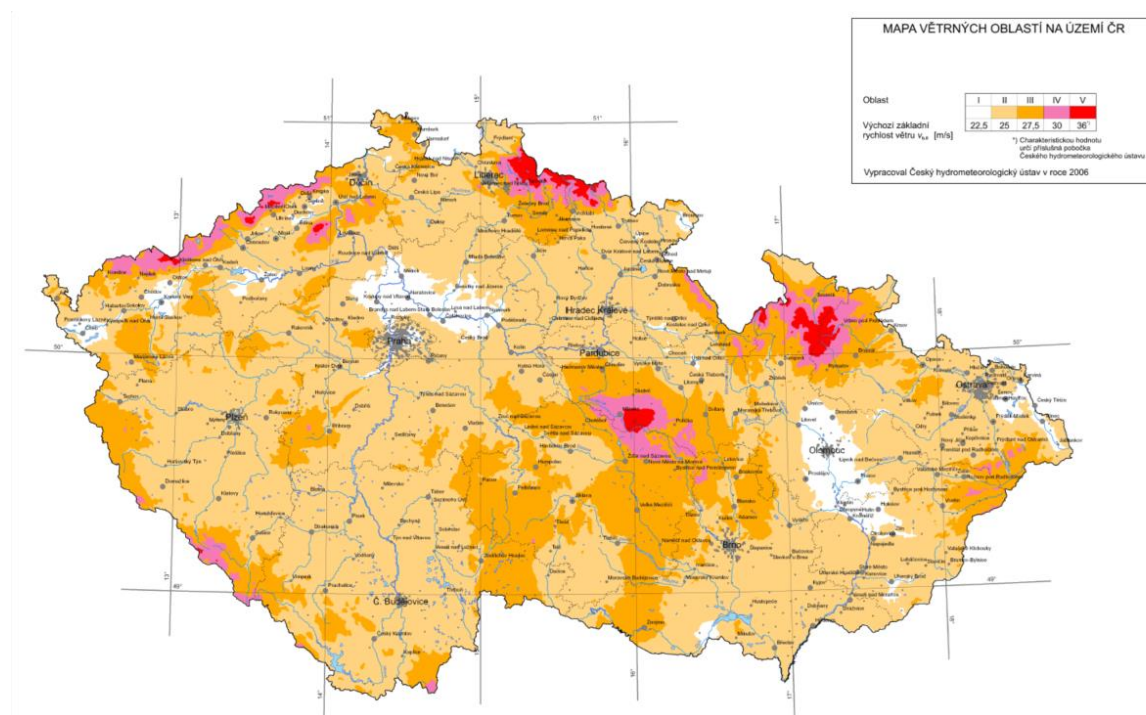
---

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Obrázek-Mapa větrových oblastí na území ČR

Příloha 2: K tištěné verzi diplomové práce bylo dodáno CD, na kterém se nachází  
diplomová práce v elektronické podobě (formát.pdf)

## PŘÍLOHA 1



Obrázek 0.1 Mapa větrných oblastí na území ČR dle ČSN EN 1991-1-4 [24]